Adolfo Escamilla Esquivel

Metrología

y sus aplicaciones

GRUPO EDITORIAL PATRIA

Subido por:

Libros de Ingeniería Química y más

https://www.facebook.com/pages/Interfase-IQ/146073555478947?ref=bookmarks

Si te gusta este libro y tienes la posibilidad, cómpralo para apoyar al autor.

METROLOGÍA
Y SUS APLICACIONES

METROLOGÍA
Y SUS APLICACIONES

Adolfo Escamilla Esquivel
Instituto Politécnico Nacional

PRIMERA EDICIÓN EBOOK
MÉXICO, 2014

GRUPO EDITORIAL PATRIA

Para establecer comunicación con nosotros puede hacerlo por:

correo:
Renacimiento 180, Col. San Juan Tlihuaca, Azcapotzalco, 02400, México, D.F.

fax pedidos:
(01 55) 5354 9109 • 5354 9102

e-mail:
info@editorialpatria.com.mx

home page:
www.editorialpatria.com.mx

Dirección editorial: Javier Enrique Callejas
Coordinación editorial: Estela Delfín Ramírez
Diseño de interiores: Braulio Morales Sánchez
Diseño de portada: Eleazar Maldonado San Germán (Factor02)
Ilustraciones: Arturo D. Ramírez (Nemesis)
Fotografías: Víctor Hugo Patiño Chávez/Jupiter Images Corporation.

Revisión técnica
Celia Ivonne Saucedo Hernández
Instituto Politécnico Nacional

Metrología y sus aplicaciones
Derechos reservados:
© 2014, Adolfo Escamilla Esquivel
© 2014, GRUPO EDITORIAL PATRIA, S.A. DE C.V.
Renacimiento 180, Colonia San Juan Tlihuaca,
Delegación Azcapotzalco, Código Postal 02400, México, D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana
Registro núm. 43

ISBN ebook: 978-607-438-927-2

Queda prohibida la reproducción o transmisión total o parcial del contenido de la presente obra en cualesquiera formas, sean electrónicas o mecánicas, sin el consentimiento previo y por escrito del editor.

Impreso en México
Printed in Mexico

Primera edición ebook: 2014

CONTENIDO

Introducción xi

Capítulo 1
Conceptos de Metrología 1

Introducción a la medición 2
Historia de la metrología 2
Definición de metrología 9
Principios y fundamentos de la metrología física 9
(Medición) patrón 10
Cantidades 11
Cantidad 11
Unidades y escalas 11
Realización y referencias 11
Patrón primario 12
Valores medidos 12
Trazabilidad 12
Normalización 14
Tipos de metrología 16
Metrología eléctrica 16
Tiempo y frecuencia 16
Mediciones electromagnéticas 16
Termometría 16
Metrología física 17
Óptica y radiometría 17
Vibraciones y acústica 17
Metrología mecánica 17
Dimensional 17

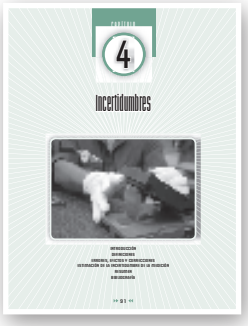
Masa y densidad 18
Fuerza y presión 18
Flujo y volumen 18
Metrología de materiales 18
Materiales metálicos 18
Materiales cerámicos 18
Materiales orgánicos 18
Exactitud, precisión, repetibilidad, reproducibilidad 19
Exactitud de medición 19
Precisión de medición 19
Repetibilidad (de los resultados de mediciones) 20
Reproducibilidad (de los resultados de mediciones) 20
Sistemas de unidades 20
Sistema Inglés 21
Unidades de área 22
Unidades de capacidad y volumen 22
Volumen en general 22
Volumen líquido 22
Volumen en seco 22
Unidades de masa 22
Sistema Internacional de Unidades (SI) 23
Conversión de unidades 26
Regla para conversión de unidades 27
Conversión entre unidades base 27
Conversión entre unidades derivadas 28
Conversiones en el Sistema Internacional de Unidades (SI) 29
Números 31
Signo decimal 31
Conversión de sistema a sistema 31
RESUMEN 34
BIBLIOGRAFÍA 35

Capítulo 2
Instrumentos de medición dimensional 37
Tipos de instrumentos de medición dimensional 38
Reglas para efectuar mediciones 38
Manejo de los instrumentos de medición dimensional 40
Calibradores con vernier 40
Tipos de calibradores 41
Calibrador con vernier con botón 41
Calibrador con vernier con tornillo de ajuste 41

Calibrador con vernier de carátula 42
Precauciones al medir 43
Paso 1. Verificar que el calibrador no esté dañado 43
Paso 2. Ajustar el calibrador correctamente sobre el objeto que se está midiendo ... 44
Paso 3. Guardar adecuadamente el calibrador después de usarlo 47
Cómo leer el calibrador (sistema métrico) 47
Cómo leer el calibrador (sistema inglés) 49
Micrómetros o palmer 51
Tipos de micrómetros 53
Micrómetro para interiores 53
Micrómetros para aplicación especial 53
Micrómetro para ranuras 54
Micrómetro de puntas 54
Micrómetro para ceja de latas 54
Micrómetro indicativo 54
Micrómetro de exteriores con husillo no giratorio 54
Micrómetro con doble tambor 54
Micrómetro tipo discos para espesor de papel 54
Micrómetro de cuchillas 54
Micrómetros para espesor de láminas 55
Micrómetro para dientes de engranaje 55
Micrómetros para dimensiones mayores a 25 mm 55
Precauciones al medir y cómo usar el micrómetro del tipo de freno de fricción 55
Paso 1. Verificar la limpieza del micrómetro 55
Paso 2. Utilizar el micrómetro adecuadamente 55
Paso 3. Verificar que el cero esté alineado 56
Paso 4. Asegurar el contacto correcto entre el micrómetro y el objeto 57
Cómo corregir el punto cero 58
Método I 58
Método II 58
Cómo leer el micrómetro (sistema métrico) 59
Cómo leer el micrómetro (sistema inglés) 62
Esferómetro 63
Ejemplos de uso 64
Calibrador de altura o medidor de altura 65
Precauciones al usar el medidor de altura 65
Medidor de altura con carátula y contador 66
Medidor de altura electrodigital 66
Calibres de tolerancia 66
Tipos de calibres 67
Calibres para pernos o ejes 67
Calibres para agujeros cilíndricos 67
Calibres para espesores de superficies planas 67

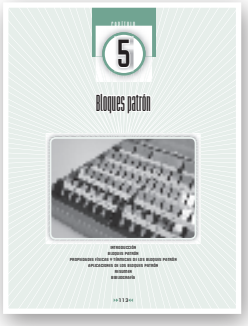
Calibres para interiores de superficies planas 67
Calibres para agujeros cónicos y troncos cónicos 67
Calibres para roscas 67
Calibres para radios 68
Sondas o calibres de espesores (lainas) 68
Peines o calibres para roscas 68
Comparador de carátula 69
Falsas escuadras 69
Goniómetros 70
Escuadras 70
Transportador universal 71
Regla de senos 71
RESUMEN 73
BIBLIOGRAFÍA 74

Capítulo 3
Tolerancia y mediciones 75
Introducción 76
Significado de tolerancia 77
Dimensionamiento geométrico y tolerancias 77
Principio de máximo material (MMC) 78
Tipos de características geométricas 79
Características geométricas, símbolos y términos 79
Rectángulo de tolerancia 81
Elemento controlado 81
Elementos de referencia 82
Especificaciones restrictivas 85
Cotas teóricamente exactas 86
Tolerancias 86
Tolerancias de forma, orientación, perfil y control 86
Tolerancias de ubicación 86
RESUMEN 87
BIBLIOGRAFÍA 87



Capítulo 4
Incertidumbres 89
Introducción 90
Definiciones 91

Incertidumbre (de la medición) [NMX-Z-055-IMNC] 91
Incertidumbre estándar [NMX-Z-055-IMNC] 91
Evaluación (de incertidumbre) Tipo A [NMX-Z-055-IMNC] 91
Evaluación (de incertidumbre) Tipo B [NMX-Z-055-IMNC] 91
Incertidumbre estándar combinada [NMX-Z-055-IMNC] 92
Incertidumbre expandida [NMX-Z-055-IMNC] 92
Factor de cobertura [NMX-Z-055-IMNC] 92
Errores, efectos y correcciones 92
Estimación de la incertidumbre de la medición 92
Identificación de las incertidumbres en los procesos de medición 93
Evaluación y clasificación de los tipos de incertidumbre (tipo A o tipo B) 93
Evaluación tipo A de la incertidumbre estándar 95
Evaluación tipo B de la incertidumbre estándar 96
Cuantificación (evaluación y cálculo) de las incertidumbres individuales por varios métodos 100
Presupuesto de incertidumbre 103
Combinación de las incertidumbres 103
Asignación del factor de cobertura k apropiado a la incertidumbre combinada para reportar la incertidumbre expandida 106
Grados de libertad para incertidumbres tipo A 106
Grados de libertad para incertidumbres tipo B 107
Documentación de un reporte de incertidumbre con la información apropiada 110
RESUMEN 110
BIBLIOGRAFÍA 110



Capítulo 5

Bloques patrón 111
Introducción 112
Bloques patrón 113
Historia breve de los bloques patrón 113
Bloques patrón estándar 114
Nomenclatura y definiciones 115
Grados de tolerancia 117
Requisitos de recalibración 118
Estándares internacionales 119
Propiedades físicas y térmicas de los bloques patrón 119
Materiales 119
Expansión térmica 120
Expansión térmica de materiales de bloques patrón 120
Incertidumbre por expansión térmica 123
Propiedades elásticas 124

Deformación por contacto en comparaciones mecánicas 125
Aplicaciones de los bloques patrón 126
Reglas para el cuidado de los bloques patrón 127
Teoría de la adherencia de bloques patrón 128
Técnica para adherir bloques patrón 129
Método para combinar bloques patrón 130
RESUMEN 132
BIBLIOGRAFÍA 132

Glosario 135
Índice analítico 137

Introducción

La naturaleza humana es muy variada; constantemente vemos, oímos, olemos, probamos y tocamos objetos y productos, es decir, hay un flujo de sensaciones constante. El trabajo de la metrología es describir, en forma ordenada, esta experiencia, un trabajo que la curiosidad del hombre ha conducido durante muchos siglos y que, por fortuna seguramente nunca terminará.

El metrólogo ha seleccionado como campo de estudio una porción especial de la gran variedad de experiencias humanas y ha abstraído ciertos aspectos que le parecen susceptibles de describir con exactitud, es decir, de medirlos. Al principio, el metrólogo se contentó con adquirir esta experiencia en forma pasiva para describir lo que veía, olía, etcétera, y la forma en que estas sensaciones llegaban a él. En tiempos más recientes ha tomado un papel activo en la adquisición del conocimiento por medio de la experimentación. En este caso, con sus descripciones, el metrólogo construye un nuevo mundo, un mundo propio e integrado a su compañía, institución, comunidad, estado, nación, tanto en el ámbito nacional como en el mundial.

(Jupiter Images Corporation)

Las creaciones y los trabajos producto de la imaginación e ingenio del metrólogo han conformado el mundo de las unidades, sistemas de unidades, trazabilidad, patrones, normas, métodos, sistemas de certificación, especificaciones, etc. El metrólogo construye estos sentidos y percepciones mentales entre los grandes grupos de fenómenos. En resumen, un experimento es controlado de acuerdo con la percepción sensora que se tiene de él. Existen tres aspectos a considerar:

1. En el desarrollo de un experimento el investigador abstrae deliberadamente de la experiencia total una pequeña porción para estudiarla en forma intensiva. Por ejemplo, de los fenómenos asociados con el concepto de calor, el experimentador puede elegir investigar aquél que concierne a la relación entre el calentamiento y el tamaño de un objeto.
2. El experimentador tiene ciertas ideas acerca del procedimiento y el resultado que puede esperar.
3. El investigador realiza una serie de operaciones manuales para lograr su objetivo. Él sigue activamente la naturaleza con sus conocimientos.

(Jupiter Images Corporation)

Considerando estos tres aspectos, un experimento en esencia, no ha tenido relación con la cuantificación. Durante muchos siglos, sin embargo, el hombre ha sentido la urgencia de describir sus experimentos en términos numéricos, es decir, de hacer mediciones.

En la actualidad, un experimento físico que no involucre medición es considerado poco valioso. El metrólogo experimentador siente que realmente no entiende cómo avanzan las cosas si la pregunta ¿cuánto? no tiene respuesta. En cada laboratorio, taller, línea de producción y prácticamente dondequiera, es posible encontrar aparatos o dispositivos con escalas, y éstas con marcas y números asociados a cada hecho relacionado con la metrología.

Es un hecho que cada lector pensará en la medición física que le sea más familiar, por ejemplo, al consultar el reloj de pulsera reconocerá en cada análisis la medición, leerá la hora desde la carátula con la posición de las agujas. Piense que esto sucede en los medidores eléctricos, reglas, medidores de corriente, voltaje y potencia, en los termómetros, rugosímetros, micrómetros, calibradores, medidores de presión, etcétera.

La metrología es una ciencia que tiene impacto en los más diversos ámbitos de acción del ser humano, como el comercio, el medio ambiente, la salud y en la sociedad en general. Su desarrollo es clave para incrementar la competitividad internacional del sector productivo mexicano.

En esta obra nos adentraremos en el estudio de esos procesos a través de un modelo de medición y estudiaremos cómo es que el hombre ha desarrollado normas de aplicación internacional y sistemas de unidades de uso común.

Estudiaremos los principios de operación de diversos instrumentos de medición, nos percataremos de ese ingenio humano para poder medir diversas magnitudes físicas y que puedan ser comparadas con las desarrolladas en otras partes del mundo.

Analizaremos, asimismo, un modelo de mantenimiento de instrumentos de medición, equipos y maquinaria, así como los principios para la calibración y verificación metrológica de los instrumentos de medición.

CAPÍTULO

1

Conceptos de Metrología

Jupiter Images Corporation

Introducción a la medición
Historia de la metrología
Definición de metrología
Tipos de metrología
Exactitud, precisión, repetibilidad, reproducibilidad
Sistemas de unidades
Resumen
Bibliografía

Introducción a la medición

La medición es un proceso que realizamos cotidianamente, aun sin estar conscientes de ello. Cuando vamos al mercado a comprar la despensa, pedimos por ejemplo, 1 kg de tortillas, medio metro de franela, media gruesa de naranjas; si vamos a comprar ropa, pedimos un pantalón de talla 32 y una camisa de talla mediana; si deseamos adquirir un electrodoméstico, buscamos el que menos consumo de kilowatt-hora tenga; si deseamos que nuestro teléfono celular funcione, adquirimos tiempo-aire (una tarjeta de 100 min, por ejemplo); si vamos a un café internet, nos cobran 30 min de navegación. De esta forma, vemos que en cada actividad que realizamos necesitamos medir alguna magnitud. Fácilmente nos convencemos de que una gran cantidad de artículos que consumimos no se producen en nuestro país, entonces podríamos preguntarnos: ¿cómo es posible que los productos que adquirimos satisfacen nuestras necesidades?, ¿cómo puede utilizarse en México un reproductor de DVD fabricado en Japón?, ¿cómo puedo comprar zapatos de mi talla que fueron hechos en España?, ¿cómo puedo utilizar un teléfono celular elaborado en Noruega? Encontraremos la respuesta a estas interrogantes en el desarrollo de este capítulo.

Empezaremos por describir desde el punto de vista histórico cómo fue que el hombre empezó a medir el tiempo. Cuando el ser humano descubrió cómo medir esta magnitud, marcó el inicio de la civilización, pues medir correctamente el paso de las estaciones permitió el desarrollo de la agricultura y la cacería, actividades que en el inicio de la civilización fueron la fuente de la riqueza. Por otro lado, al analizar el desarrollo de los relojes actuales, no podemos dejar de sorprendernos de que en los juegos olímpicos los récords mundiales en las carreras de 100 m planos se midan en centésimas de segundo, o que a través del Sistema Posicionador Global (*Global Positioning System*, GPS), podamos ubicar a vehículos o a personas en cualquier parte del mundo con un error no mayor a 15 m.

Encontraremos una definición de la metrología y una revisión de cómo es que los países han logrado ponerse de acuerdo para comercializar y vender productos que sean satisfactorios para los consumidores a través de acuerdos internacionales que se adoptan como leyes o normas en cada país, y en los que México participa activamente.

Haremos una clasificación de los distintos tipos de metrología con base en la estructura del Centro Nacional de Metrología, que es el origen de todas las mediciones realizadas en México, ya que ahí es donde se desarrollan y resguardan todos los patrones nacionales de medición.

Revisaremos brevemente los conceptos aritméticos, algebraicos y trigonométricos que debe dominar cualquier persona involucrada en algún proceso de medición.

Concluimos la unidad con el estudio de los sistemas de unidades, fundamentalmente con el Sistema Internacional de Unidades y con el Sistema Inglés, así como sus conversiones entre éstos.

Historia de la metrología

Desde el lejano noroeste de Groenlandia hasta el extremo más meridional de la Patagonia, los hombres saludan a la luna nueva comiendo y bebiendo, con cantos y plegarias. Todos sienten deseos de bailar a la luz de la Luna. Y la Luna posee además otras virtudes. Hace dos mil años

aproximadamente, Tácito escribió que las antiguas comunidades germánicas se reunían cuando había luna nueva o luna llena, los días más favorables para comenzar cualquier asunto.

El primer gran descubrimiento fue el tiempo, el terreno de la experiencia. Sólo señalando los meses, las semanas y los años, los días y las horas, los minutos y los segundos, pudo la humanidad liberarse de la cíclica monotonía de la naturaleza. El correr de las sombras, de la arena y del agua, del tiempo mismo, traducido al staccato del reloj, se convirtió en una útil medida de los movimientos del hombre a través del planeta. Los descubrimientos del tiempo y el espacio llegaron a ser una dimensión continua. Las comunidades de tiempo produjeron las primeras comunidades de conocimiento, las maneras de compartir el descubrimiento, una frontera común de lo desconocido.

Francis Bacon, *Of innovations (1625)*

Figura 1.1 *Retrato de Francis Bacon (Jupiter Images Corporation).*

Por todas partes hallamos vestigios de significados míticos, místicos o románticos en las palabras alunado o lunático, y hasta en la costumbre de los enamorados de citarse a la luz de la Luna. Pero todavía más profunda es la primitiva relación entre la Luna y la medición. La palabra *moon* en inglés y su equivalente en otras lenguas proviene de la misma raíz, me, que significa medida (como en la palabra griega *metron*, y en las inglesas *meter* y *measure*), que nos recuerda los servicios que antaño prestara la Luna como primer instrumento universal para medir el tiempo.

Pero a pesar de la facilidad con que se le podía utilizar como medida de tiempo, o quizás a causa de ello, la Luna resultó ser una trampa para la ingenua humanidad. Si bien las fases de la Luna eran ciclos universales que cualquiera podía observar, también representaban un atractivo callejón sin salida. Los cazadores y agricultores necesitaban, ante todo, un calendario de las estaciones, un medio que les permitiera predecir la llegada de la lluvia o de la nieve, del frío y del calor. ¿Cuánto falta para la época de la siembra? ¿Cuándo debemos esperar las primeras heladas?, ¿y las grandes lluvias?

La Luna ayudaba muy poco a resolver estas necesidades, pues un mes sideral, o el tiempo que necesita la Luna para volver a ocupar la misma posición en el cielo, es de poco menos de veintiocho días. Pero el año solar, la única manera exacta de medir los días entre una estación y otra, dura trescientos sesenta y cinco días y un cuarto. Los ciclos de la Luna se deben al movimiento giratorio de ésta alrededor de la Tierra, al mismo tiempo que nuestro planeta gira alrededor del Sol. La órbita de la Luna es elíptica y se desvía un ángulo aproximado de cinco grados de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Esto explica por qué no hay eclipse de Sol todos los meses.

El hecho desconcertante de que los ciclos del Sol no tienen relación con los de la Luna fue un estímulo para el pensamiento. Si hubiese sido posible calcular la duración del año y la sucesión de las estaciones mediante la mera multiplicación de los ciclos de la Luna, la humanidad se hubiese ahorrado muchísimos esfuerzos, pero con ello tal vez hubiese faltado el estímulo necesario para estudiar los cielos y llegar a formar matemáticos.

Las estaciones del año, tal como las conocemos en la actualidad, están regidas por los movimientos de la Tierra alrededor del Sol. Cada sucesión de estaciones señala el retorno de la Tierra al mismo lugar del circuito, en un movimiento que va desde un equinoccio (o solsticio) al siguiente. El hombre necesitaba un calendario para orientarse respecto a las estaciones. ¿Cómo fue el comienzo?

Mientras la humanidad vivió cultivando la tierra y apacentando sus rebaños, no hizo mucha falta medir el tiempo en unidades pequeñas. Las estaciones eran lo realmente importante. Mediante ellas se sabía cuándo había que esperar las lluvias, la nieve, el Sol, el frío. ¿Para qué molestarse con las horas y los minutos? El tiempo de la luz diurna era el único importante, el único tiempo en que los hombres podían trabajar. Medir el tiempo útil era, pues, medir las horas de Sol.

La sombra del Sol continuó siendo durante muchos siglos la medida universal del tiempo. Y era ésta una medida muy conveniente, pues cualquier persona podía fabricar en cualquier lugar un sencillo reloj de Sol sin necesidad de instrumentos o conocimientos especiales. Pero la jocosa bravata inscrita en los relojes de Sol modernos, "Yo sólo cuento las horas soleadas", proclama la evidente limitación de estos aparatos para medir el tiempo. Un reloj de Sol mide la sombra del astro, y si no hay Sol no hay sombra. Estos relojes sólo fueron útiles en aquellas regiones del mundo donde las horas de luz solar eran abundantes, y aun así, sólo servían cuando el Sol brillaba realmente. El movimiento de la sombra que proyectaba el Sol, incluso cuando brillaba, era tan lento que hubiera sido de escasa ayuda para marcar los minutos y totalmente inútil para marcar los segundos. El cuadrante que indicaba el paso del día en un lugar determinado no servía para dar una medida común universal, por ejemplo la hora de sesenta minutos. En todas partes, con la sola excepción del ecuador, el espacio de tiempo iluminado por el Sol varía de un día al otro de acuerdo con las estaciones. Si se quiere utilizar la sombra proyectada por el Sol para determinar la hora en cualquier región de la Tierra conforme a la hora media establecida por Greenwich, son necesarios conocimientos coordinados de astronomía, matemáticas, geografía y mecánica. Las horas no fueron determinadas con exactitud en los relojes de Sol hasta el siglo XVI. Cuando se desarrolló esta ciencia del cuadrante, se puso de moda llevar un reloj de Sol de bolsillo, aunque ya existían entonces los relojes mecánicos, mucho más cómodos y útiles en todo sentido.

¿Cómo se liberó la humanidad del Sol? ¿Cómo conquistamos la noche y la hicimos parte del mundo inteligible? Sólo escapando a la tiranía del Sol aprenderíamos alguna vez a medir nuestro tiempo en porciones universalmente uniformes. Sólo entonces las recetas para la acción y la creación podrían ser entendidas por doquier y en cualquier momento. El tiempo era, según la frase de Platón, "una imagen en movimiento de la eternidad". No es extraño, pues, que el deseo de medir su curso tentara y atormentara a la humanidad en todo el planeta.

Cuenta la tradición que en 1583, cuando Galileo Galilei (1564-1642) tenía diecinueve años de edad y asistía a los oficios religiosos que se celebraban en el baptisterio de la catedral de Pisa, se distrajo mirando el balanceo de la lámpara del altar. Fuera cual fuese la amplitud de la oscilación de la lámpara, parecía que el periodo que tardaba en ir de un extremo del arco al otro era siempre el mismo. Galileo, desde luego, no tenía reloj, pero comprobaba los intervalos de las oscilaciones mediante su propio pulso. Este raro acertijo de la vida cotidiana hizo que Galileo abandonara el estudio de la medicina, que había emprendido obligado por su padre, y

se dedicara al estudio de las matemáticas y la física. El joven había descubierto en el baptisterio lo que los físicos llamarían luego isocronismo, o igualdad de la oscilación del péndulo, es decir, que el periodo de oscilación de un péndulo no varía según la amplitud de la oscilación, sino en razón de la longitud del péndulo.

Este sencillo descubrimiento fue el símbolo de una nueva era. Hasta ese momento la enseñanza de la astronomía y la física en la Universidad de Pisa, donde estaba matriculado Galileo, se reducía a cursos sobre los textos de Aristóteles. El modo de aprender de Galileo, basado en la observación y la comprobación de lo que veía, representaba la ciencia del futuro. El descubrimiento de Galileo, a pesar de que éste nunca le sacó su máximo provecho, abrió las puertas de una nueva era en la medición del tiempo. El margen de error de los mejores aparatos para medir el tiempo se redujo —dentro de las tres décadas siguientes a la muerte de Galileo—, de 15 min a sólo 10 s por día.

Figura 1.2 *Galileo Galilei observa el movimiento del candelabro (Jupiter Images Corporation).*

Un reloj que funcionaba al unísono con muchos otros convertía al tiempo en una dimensión que trascendía el espacio. Los ciudadanos de Pisa podían saber qué hora era en Florencia o en Roma en un mismo instante. Estos relojes, una vez sincronizados, continuarían funcionando igual. En lo sucesivo, el reloj ya no sería una mera comodidad local para medir las horas de trabajo de los artesanos, fijar el horario de las plegarias o de las reuniones del ayuntamiento, sino una norma universal. Del mismo modo que la hora única había uniformado las unidades de día y de noche, invierno y verano, en cualquier ciudad, ahora el reloj de precisión uniformaba las unidades de tiempo en todo el planeta. Ciertas peculiaridades de nuestro planeta hicieron posible esta magia. Todos los lugares de la Tierra experimentan, a causa de la rotación del planeta sobre su eje, un día de veinticuatro horas por cada vuelta completa de 360 grados. Los meridianos de longitud señalan estos grados. La Tierra, a medida que gira, hace que sea mediodía en diferentes lugares sucesivamente. Cuando en la Ciudad de México es mediodía, en Tijuana, hacia el oeste, sólo son las diez de la mañana. Podemos afirmar entonces que Tijuana está a treinta grados de longitud, o a dos horas al oeste de la Ciudad de México, lo que hace que estos grados de longitud sean a la vez una medida de tiempo y de espacio.

En 1714, estimulado por un desastre naval atribuido a la navegación inexacta, el Parlamento Británico aprobó el *Acuerdo de la Longitud*. Este acuerdo creó un premio de 20 000 libras —una enorme suma para esa época— que sería entregado al inventor de un método exacto para determinar la longitud. Esto podría lograrse ya que la longitud puede calcularse a partir de la posición del Sol o de las estrellas siempre y cuando el tiempo se midiera exactamente.

Lo que se necesitaba era un reloj exacto, un reloj que pudiera usarse en el mar, pues los relojes de péndulo no eran de utilidad para este propósito. John Harrison resolvió el problema al desarrollar un reloj mecánico, cuya tecnología estaba basada en el uso de resortes y tenía una exactitud de unos cuantos segundos en varios meses. Después de varios años de trámites burocráticos, Harrison recibió el premio.

La navegación sigue siendo una de las principales aplicaciones de los relojes exactos. En la actualidad se ha garantizado la navegación segura con el GPS (Global Positioning System), cuya fenomenal exactitud para la navegación está basada en relojes que mantienen el tiempo dentro de 0,000 000 003 segundos. Sin embargo, la navegación no siempre ha proporcionado el estímulo para mejorar los relojes. En algunos casos la navegación fue la beneficiaria de los avances en la física.

Para los físicos modernos, el desarrollo de mejores relojes proporciona medios naturales para el estudio de varios aspectos de la naturaleza, incluyendo las constantes fundamentales y la interacción de la radiación con la materia.

Durante siglos, el día solar medio sirvió como unidad de tiempo, pero el periodo de rotación es irregular y crece lentamente. En 1956, la Unión Astronómica Internacional y el Comité Internacional de Pesas y Medidas recomendaron adoptar el Tiempo Efemeris –basado en el movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol– como una base más estable y exacta para la definición del tiempo. Cuatro años más tarde, la recomendación de las dos organizaciones fue ratificada formalmente por la Conferencia General de Pesas y Medidas.

El primer reloj atómico fue desarrollado en 1949 por el norteamericano Harold Lyons del National Bureau of Standards (NBS), pionero del National Institute of Standards and Technology (NIST) de los Estados Unidos de América, y estaba basado en las transiciones atómicas de la molécula de amoniaco. A mediados de la década de 1950, los británicos Louis Essen y John Parry, del National Physical Laboratory (NPL) de Inglaterra, construyeron un reloj atómico significativamente más estable y exacto.

El cambio ocurrió en 1967 cuando, por acuerdo internacional, se definió el segundo como la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado base del átomo de ^{133}Cs. Esta definición hizo que el tiempo estuviera de acuerdo con el segundo basado en el Tiempo Efemeris, hasta donde las mediciones lo permiten.

En México, el Centro Nacional de Metrología (CENAM) es el laboratorio encargado de mantener los relojes atómicos y de reproducir la unidad de tiempo, el segundo, de acuerdo con los estándares internacionales.

Esta historia de cómo se desarrollaron los instrumentos para medir el tiempo, los relojes, nos da una idea de las dificultades con las que nos podemos enfrentar si deseamos medir otras magnitudes, sobre todo si necesitamos realizar mediciones cada vez más exactas (pensemos simplemente en que la humanidad tardó aproximadamente 5 000 años en desarrollar los relojes de cuarzo que actualmente utilizamos en nuestra muñeca).

Aun cuando la estandarización de pesas y medidas ha sido una meta del avance social y económico desde hace mucho tiempo, no fue sino hasta el siglo XVIII que se desarrolló un sistema unificado de mediciones. Los primeros sistemas de pesas y medidas estaban basados en la morfología humana. Frecuentemente, los nombres de las unidades se referían a partes

del cuerpo: la pulgada, la mano, el pie y la yarda corresponden a las dimensiones del cuerpo humano. Consecuentemente, esas unidades de medición no eran fijas, variaban de una ciudad a otra, de una ocupación a otra, y en el tipo de objeto a ser medido.

La falta de un sistema de mediciones estandarizado fue una fuente de errores y fraudes en transacciones sociales y comerciales, poniendo freno al comercio internacional y evitando el desarrollo de la ciencia como compromiso internacional. Con la expansión de la industria y el comercio, hubo una creciente necesidad entre países de armonizar las pesas y medidas. Los políticos y científicos resolvieron esta situación adoptando un estándar de medida (distancia o peso) por comparación con un estándar tomado de la naturaleza.

Una de tales medidas fue el metro, el cual se definió en un decreto de la Asamblea Nacional Francesa (7 de abril de 1795) como la diez millonésima parte de un cuarto del meridiano terrestre, pero especificado por mediciones realizadas entre Dunkerke y Barcelona. Tal unidad no es arbitraria, ya que está basada en el tamaño de la Tierra. Una vez que la unidad de longitud se definió, fue posible establecer las unidades resultantes de medición: el metro cuadrado (para área) y el metro cúbico (para volumen).

El kilogramo se definió originalmente como el peso de un cierto volumen de agua, un líquido fácil de obtener y purificar.

Tal sistema de múltiplos simples de unidades base se extendió muy fácil. Inicialmente el sistema métrico decimal se introdujo en Francia el 7 de abril de 1795 por la "Ley sobre pesas y medidas". Esta ley produjo un cambio mayor en la vida cotidiana, facilitando los cálculos, por ejemplo de áreas y volúmenes. La conversión de un submúltiplo a un múltiplo de la unidad de longitud consiste en mover la coma decimal dos o tres lugares para área o volumen, respectivamente.

Los primeros estándares (etalones) del metro y el kilogramo (véase figura 1.3), contra los cuales se compararían las futuras copias, fueron depositados en los Archivos de la República Francesa en 1799, dedicados a "todos los hombres y todos los tiempos".

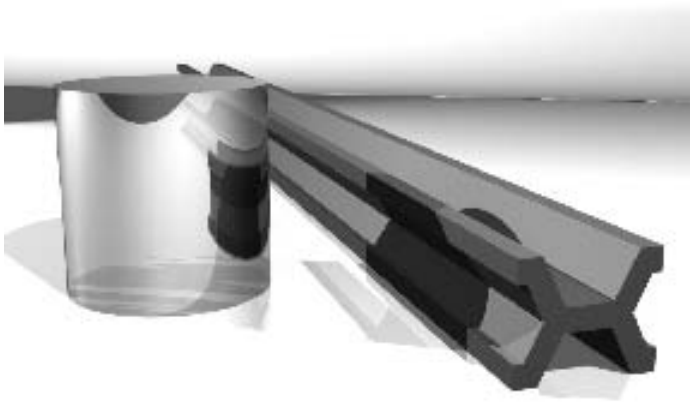


Figura 1.3 *Estándares patrón (etalones) del kilogramo y del metro.*

Posteriormente, debido a su simplicidad y universalidad, el sistema métrico decimal se dispersó rápidamente fuera de Francia. El desarrollo de los ferrocarriles, el crecimiento de la industria y la creciente importancia del intercambio social y económico, requerían de unidades de medición exactas y confiables. Adoptado a principios del siglo XIX en varias provincias italianas, el sistema métrico decimal fue aceptado en Holanda en 1816 y seleccionado por España en 1849. En Francia, el sistema métrico decimal se adoptó como exclusivo con la ley del 4 de julio de 1837.

En 1860, los países de Latinoamérica adoptaron el metro, y a partir de entonces se incrementó la adopción del sistema métrico por otras naciones durante la segunda mitad del siglo

XIX (por ejemplo, los Estados Unidos de América, en 1866; Canadá en 1871 y Alemania en 1871). México se adhirió al Tratado del Metro el 30 de diciembre de 1890. Sin embargo, esos países dependían de sus estándares nacionales que eran copias del prototipo internacional original. Esta dependencia, junto con la dificultad de uniformidad para hacer copias, limitó el deseo internacional de estandarización. Para superar esas dificultades se fundó el Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) con los términos del tratado diplomático conocido como la Convención del Metro el 20 de mayo de 1875. Para celebrar la firma de la Convención del Metro, se instituyó la fecha del 20 de mayo como el *Día Mundial de la Metrología*.

En 1948, la novena Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) encomendó al Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), mediante su resolución 6, el estudio completo de una reglamentación de las unidades de medida del sistema MKS y de una unidad eléctrica del sistema práctico absoluto, a fin de establecer un sistema de unidades de medida susceptible de ser adoptado por todos los países signatarios de la Convención del Metro. Esta misma conferencia, en su resolución 7, fijó los principios generales para los símbolos de las unidades y proporcionó una lista de nombres especiales para ellas.

En 1954, la décima CGPM, en su resolución 6, adoptó las unidades de base de este sistema práctico de unidades en la forma siguiente: de longitud, metro; de masa, kilogramo; de tiempo, segundo; de intensidad de corriente eléctrica, ampere; de temperatura termodinámica, kelvin; de intensidad luminosa, candela.

En 1956, el Comité Internacional de Pesas y Medidas, emitió su recomendación número 3 por la que estableció el nombre de Sistema Internacional de Unidades (SI), para las unidades de base adoptadas por la décima CGPM.

Posteriormente, en 1960, la décima primera CGPM en su resolución 12, fijó los símbolos de las unidades de base, adoptó definitivamente el nombre de Sistema Internacional de Unidades; designó los múltiplos y submúltiplos y definió las unidades suplementarias y derivadas.

La decimacuarta CGPM efectuada en 1971, mediante su resolución 3, decidió incorporar a las unidades de base del SI, la mol como unidad de cantidad de sustancia. Con ésta son siete las unidades de base que integran el Sistema Internacional de Unidades.

En 1980, en ocasión de la reunión del CIPM, se hizo la observación de que el estado ambiguo de las unidades suplementarias comprometía la coherencia interna del SI y decidió recomendar que se interpretara a las unidades suplementarias como unidades derivadas adimensionales (resolución número 1).

Finalmente, la vigésima CGPM, celebrada en 1995, decidió aprobar lo expresado por el CIPM en el sentido de que las unidades suplementarias del SI, nombradas radián y esterradián, se consideran unidades derivadas adimensionales y recomendó consecuentemente, eliminar esta clase de unidades suplementarias del SI. Esta resolución fue aprobada, y como resultado del SI quedó conformado únicamente con dos clases de unidades: las de base y las derivadas.

La CGPM está constituida por los delegados que representan a los gobiernos de los países miembros, quienes se reúnen cada cuatro años en París, Francia. Cada conferencia general recibe el informe del CIPM sobre el trabajo realizado. En su seno se discuten y examinan los acuerdos que aseguran el mejoramiento y diseminación del Sistema Internacional de Unidades; se validan los avances y los resultados de las nuevas determinaciones metrológicas fundamentales y las diversas resoluciones científicas de carácter internacional y se adoptan las

decisiones relativas a la organización y desarrollo del BIPM. La última reunión de la CGPM, la vigésima segunda realizada desde su creación, se llevó a cabo del 13 al 17 de octubre de 2003 en París, Francia, con la participación del CENAM en representación de México.

Definición de metrología

La definición del término *metrología* en la norma mexicana NMX-Z-055: 1996. IMNC. *Metrología. Vocabulario de términos fundamentales y generales (VIM)* es:

> La **metrología** es la ciencia de la medición, comprendiendo las determinaciones experimentales y teóricas a cualquier nivel de incertidumbre en cualquier campo de la ciencia y la tecnología.

La ciencia de la medición no está, sin embargo, reservada exclusivamente a los científicos. Es de vital importancia para todos nosotros. La intrincada pero invisible red de servicios, proveedores y comunicaciones depende de la metrología para su eficiente y confiable operación, por ejemplo:

- El éxito económico de las naciones depende de la capacidad de los fabricantes y exportadores para comercializar productos y componentes manufacturados y probados precisamente.
- Los sistemas de navegación de satélites y la correlación internacional del tiempo hacen posible la localización exacta, permitiendo la interconexión de sistemas de computadoras alrededor del mundo, y facilitando que las aeronaves aterricen aun con poca visibilidad.
- La salud humana depende críticamente de la capacidad de hacer diagnósticos exactos; en éstos tienen creciente importancia las mediciones confiables, por ejemplo, la temperatura, la presión sanguínea, la estatura, el peso, la cantidad de glucosa en la sangre, etcétera.
- Los consumidores tienen que confiar en la cantidad de gasolina que surte una bomba en la gasolinera.
- El cuidado del medio ambiente requiere de la capacidad de medir partículas microscópicas en el aire o gases dañinos en la atmósfera.

Todas las formas de mediciones químicas y físicas afectan la calidad del mundo en el que vivimos.

Principios y fundamentos de la metrología física

Varios de los conceptos clásicos de metrología tienen sus raíces en la física, pero se han aplicado exitosamente a otras áreas de la ciencia y la tecnología.

La figura 1.4 muestra un modelo de la relación lógica entre estándares, medición y cantidades. Esta figura presenta la cadena lógica entre una propiedad conceptualizada y el valor medido de esa propiedad, dentro de un sistema de estándares y trazabilidad. A continuación examinaremos cada uno de los componentes de la figura 1.4.

El término *estándar* es inevitable, pero debe utilizarse cuidadosamente, ya que tiene dos significados: como una especificación (o también denominada norma) y como la realización de referencia de la unidad de una cantidad (o también denominada patrón).

La definición del VIM para el término *patrón* es:

(Medición) patrón

Medida materializada, instrumento de medición, material de referencia o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad, o uno o varios valores de una magnitud para servir de referencia.

Los dos significados son muy diferentes. Por ejemplo, el código ASCII es un estándar en el primer sentido, pero no en el segundo. Desafortunadamente, hay una tendencia a usar el término sin reflexionar sobre el sentido en el cual se está entendiendo.

Es importante entender que la figura 1.4 es un diagrama de relaciones lógicas, no de desarrollo cronológico. Históricamente, varias cantidades (podría decirse que la mayoría) empezaron como comparaciones cualitativas (por ejemplo, frío y caliente), seguidas de la invención de una cantidad definida formalmente (por ejemplo, temperatura), llegando finalmente del desarrollo de unidades, escalas y un sistema de estándares.

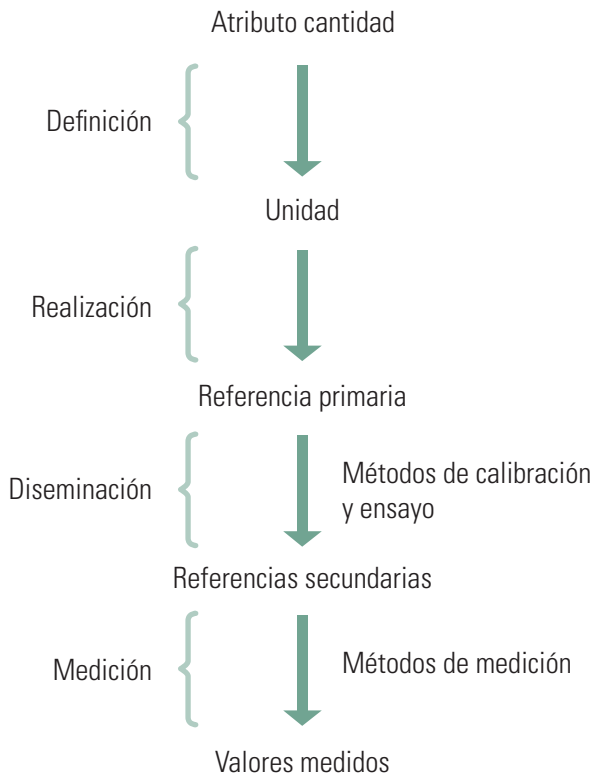


Figura 1.4 *Relación lógica entre conceptos de metrología para usarse en estandarización en mediciones.*

Cantidades

En la parte superior de la figura 1.4, la definición del VIM del término *cantidad* es:

Cantidad

Atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente.

Este concepto parece claro. Sin embargo, es necesario examinar los elementos operativos de esta definición. El primer requisito es tratar con un atributo (del sistema). En otras palabras, debe ser una propiedad específica distintiva a medir. Es indispensable comprender el impacto de este punto aparentemente obvio. Hay ejemplos de mediciones que se pueden realizar y para las que no es posible identificar una cantidad (por ejemplo, *sabor, confianza del consumidor, sensaciones*). Para esas mediciones resulta muy difícil aplicar conceptos de trazabilidad y estándares.

Sin embargo, no todos los atributos cualitativamente distintos son objeto de medida. Un atributo puede ser estrictamente cualitativo (por ejemplo, un programa de computadora podría ser un procesador de palabras, o una pintura podría ser hermosa). Para ser sujeto de medición, debe ser posible determinar un atributo cuantitativamente. Una propiedad es una cantidad si ésta permite un ordenamiento lineal del sistema de acuerdo con esa propiedad. En otras palabras, una propiedad p es una cantidad si siempre podemos decir que dos sistemas que tienen la propiedad p, son iguales en p o que un sistema es menor que el otro en p. Asignar números a las propiedades no es suficiente. Los números deben ser significativos en términos de una relación de orden entre los objetos que tienen dicha propiedad.

Unidades y escalas

La existencia de una cantidad es un requisito necesario, pero no suficiente para la existencia de una medición. Para hacer mediciones, es necesario asignar un número a las cantidades. Consideremos los siguientes aspectos que definen una medición:

1. Hay una regla para asignar un valor determinado (usualmente cero) a la cantidad.
2. Hay un estado específico, reproducible de los objetos para el cual debe asignarse un segundo valor especial (usualmente uno), esto es, debe haber una unidad.
3. Hay una escala de múltiplos y submúltiplos de la unidad, y una regla que establece las condiciones empíricas en las que dos intervalos medidos son iguales, por ejemplo, 1 cm tiene el mismo intervalo de longitud en cualquier punto de la regleta.

Realización y referencias

Las definiciones de cantidad y unidad no son suficientes para proveer los medios necesarios para una medición. La medición es en esencia, la comparación de un objeto, no con la unidad de la cantidad que está siendo medida, sino con una realización física de la unidad.

El objeto en medición se compara respecto a la cantidad correspondiente, por una serie de operaciones con los miembros de un conjunto de estándares o sus equivalentes.

El VIM define diversos tipos de estándares. Usualmente hay un estándar especial:

Patrón primario

Es un patrón que es designado o ampliamente reconocido que presenta las más altas cualidades metrológicas y cuyo valor es establecido sin referirse a otros patrones de la misma magnitud.

La realización de una unidad usualmente toma la forma de un *patrón primario*. Es decir, un objeto físico o un fenómeno seleccionado para determinar la unidad de la cantidad en cuestión. En el Sistema Internacional de Unidades, sólo la unidad de masa (el kilogramo), está definido en términos de un artefacto. Las demás unidades se definen en términos de principios científicos. La realización de la unidad es un reto tecnológico.

Los patrones secundarios son estándares cuyos valores se asignan por comparación con un patrón primario de la misma cantidad. Los patrones secundarios se utilizan cuando resulta impráctico que todas las mediciones se realicen por comparación directa con el patrón primario.

Valores medidos

Un valor medido es el resultado numérico obtenido de la aplicación de un método de medición a un objeto, el cual posee una cantidad. Una característica importante de un valor medido es la trazabilidad. El comercio internacional requiere de mediciones trazables. De acuerdo con la norma mexicana NMX-Z-055: 1996. IMNC. Metrología. Vocabulario de términos fundamentales y generales (*ISO Internacional Vocabulary of Basic and General Terms of Metrology*, VIM), párrafo 6.10:

Trazabilidad

Propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón, tal que ésta pueda ser relacionada con referencias determinadas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

Esta definición debe aplicarse a un sistema de medición de acuerdo con la figura 1.4. Frecuentemente, el concepto se expresa con el adjetivo de *trazable*. La cadena ininterrumpida de comparaciones se llama cadena de *trazabilidad*. En los documentos, se encuentra frecuentemente la expresión *cadena ininterrumpida de comparaciones*. Esta frase es el fundamento para mediciones trazables en la metrología.

El concepto de trazabilidad es muy importante, pues se refiere a una propiedad de una medición que pueda ser comparada con los patrones que se encuentran en el Centro Nacional de Metrología (CENAM), es decir, todo instrumento de medición debe estar calibrado, no necesariamente por el CENAM, sino por otro laboratorio, de tal manera que dicho laborato-

rio tenga sus instrumentos calibrados, así sucesivamente hasta llegar a la comparación con el patrón nacional.

De acuerdo con NMX-EC-17025-IMNC: 2006, párrafo 5.6.2.1.1: *"Para laboratorios de calibración, el programa de calibración de los equipos debe ser diseñado y operado de modo que se asegure que las calibraciones y las mediciones hechas por el laboratorio sean trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI). Un laboratorio de calibración establece la trazabilidad de sus propios patrones de medición al sistema SI por medio de una cadena ininterrumpida de calibraciones o comparaciones que los vinculen a los pertinentes patrones primarios de las unidades de medida SI"*. Cuando hablamos de patrones primarios, nos referimos a los patrones mantenidos por el CENAM, el cual materializa las definiciones de los estándares establecidos por el Bureau Internacional des Poids et Mesures (BIPM). El BIPM, con sede en Sèvres, Francia, asegura la uniformidad mundial de las mediciones y su trazabilidad al SI. Una vez materializados los estándares definidos por el BIPM, el CENAM diseminará esas mediciones a niveles de referencia.

Los cuerpos de acreditación, como la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), tienen sus propios lineamientos para trazabilidad, como se definió. La trazabilidad está caracterizada por seis elementos esenciales:

1. **Una cadena ininterrumpida de calibraciones.** La trazabilidad empieza con una cadena ininterrumpida de comparaciones, cuyo origen se encuentra en el laboratorio nacional, internacional o patrones intrínsecos de medición y termina con los estándares de referencia de un laboratorio de metrología determinado.
2. **Incertidumbre de la medición.** La determinación de la incertidumbre para cada eslabón de la cadena de trazabilidad debe calcularse de acuerdo con métodos definidos y establecerse en cada eslabón, de tal modo que se calcule la incertidumbre de toda la cadena.
3. **Documentación.** Cada eslabón de la cadena debe realizarse de acuerdo con procedimientos documentados y generalmente aceptados, y el resultado debe registrarse en un reporte de calibración o de ensayo.
4. **Competencia.** Los laboratorios que desarrollan uno o más eslabones de la cadena deben evidenciar su competencia técnica, por ejemplo, demostrando que están acreditados o reconocidos por algún cuerpo de acreditación.
5. **Referencia a unidades SI.** Donde sea posible, los estándares primarios nacionales deben ser estándares primarios materializados de las unidades del SI.
6. **Recalibraciones.** Las calibraciones deben ser repetidas a intervalos apropiados de tiempo de tal manera que la trazabilidad de las mediciones se mantenga asegurada.

¿Qué es una cadena ininterrumpida de calibraciones? ¿Esto significa que todos los laboratorios deben enviar al CENAM a calibrar todos sus instrumentos y cumplir así por completo con los requisitos? La respuesta es simple y compleja a la vez: no, un laboratorio no tiene que enviar necesariamente sus instrumentos a calibrar al CENAM, pero debe demostrar que existe una cadena ininterrumpida de comparaciones.

Normalización

En México, el 1 de julio de 1992 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la *Ley Federal sobre Metrología y Normalización* (LFMN), la cual ha representado un avance muy importante para el desarrollo del país. En su artículo 2, la LFMN establece los objetivos de su aprobación, por lo que se transcribe a continuación:

ARTÍCULO 2º. *Esta Ley tiene por objeto:*

I. En materia de metrología:
- *a) Establecer el Sistema General de Unidades de Medida;*
- *b) Precisar los conceptos fundamentales sobre metrología;*
- *c) Establecer los requisitos para la fabricación, importación, reparación, venta, verificación y uso de los instrumentos para medir y los patrones de medida;*
- *d) Establecer la obligatoriedad de la medición en transacciones comerciales y de indicar el contenido neto en los productos envasados;*
- *e) Instituir el Sistema Nacional de Calibración;*
- *f) Crear el Centro Nacional de Metrología, como organismo de alto nivel técnico en la materia;*
- *g) Regular, en lo general, las demás materias relativas a la metrología.*

II. En materia de normalización, certificación, acreditamiento y verificación:
- *a) Fomentar la transparencia y eficiencia en la elaboración y observancia de normas oficiales mexicanas y normas mexicanas;*
- *b) Instituir la Comisión Nacional de Normalización para que coadyuve en las actividades que sobre normalización corresponde realizar a las distintas dependencias de la administración pública federal;*
- *c) Establecer un procedimiento uniforme para la elaboración de normas oficiales mexicanas por las dependencias de la administración pública federal;*
- *d) Promover la concurrencia de los sectores público, privado, científico y de consumidores en la elaboración y observancia de normas oficiales mexicanas y normas mexicanas;*
- *e) Coordinar las actividades de normalización, certificación, verificación y laboratorios de prueba de las dependencias de la administración pública federal;*
- *f) Establecer el sistema nacional de acreditamiento de organismos de normalización y de certificación, unidades de verificación y de laboratorios de prueba y de calibración;*
- *g) En general, divulgar las acciones de normalización y demás actividades relacionadas con la materia.*

En México, existen tres tipos de normas: las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), las cuales son de observancia obligatoria; las Normas Mexicanas (NMX), que son de observancia "voluntaria" –aunque si en un proceso, servicio o producto se declara su observancia, será obligatoria– y las Normas de Referencia (NRF).

Como ya se vio, el artículo 2 de la LFMN establece la creación de la Comisión Nacional de Normalización, la cual agrupa a todos los organismos que producen normas nacionales, para consulta se puede visitar el sitio www.economia-noms.gob.mx en internet.

Los siguientes sitios nos refieren a organismos internacionales que emiten normas:

Comisión Electrotécnica Internacional-IEC www.iec.ch	
IEC	La IEC (International Electrotechnical Comission) es el organismo responsable de la normalización internacional en los sectores electrónico y eléctrico, no cubiertos por la ISO. Facilita el comercio internacional de los productos electrotécnicos.
Organización Internacional de Normalización-ISO www.iso.ch	
ISO	La ISO es una federación mundial de organismos nacionales de normalización. Facilita el desarrollo de la normalización y actividades conexas en el mundo.
Organización Internacional de Metrología Legal-OIML www.oiml.int	
OIML	Organización creada para promover la armonización global de los procedimientos de metrología legal. Desarrolla reglamentos tipo y recomendaciones internacionales, como base reconocida para el establecimiento de las reglamentaciones en diversas categorías.
Unión Internacional de Telecomunicaciones-UIT www.uit.int	
ITU	La UIT tiene como funciones el logro de los objetivos de la unión en materia de normalización de las telecomunicaciones, a través del estudio de las cuestiones técnicas, de explotación, tarificación y la adopción de recomendaciones a escala mundial.
Comisión Panamericana de Normas Técnicas-COPANT www.copant.org	
COPANT	Asociación civil que agrupa a todos los organismos de normalización de los países de América Central y del Caribe: Trinidad y Tobago, República Dominicana, Cuba, Jamaica y Barbados, totalizando 25 miembros activos.
Asociación Española de Normalización www.aenor.es	
AENOR	Asociación que lleva a cabo las actividades de normalización y Certificación en España.

Cada proceso está sujeto a normas que pueden ser obligatorias o no, incluso hay procesos o productos que se fabrican en nuestro país que satisfacen normas de otras naciones, el ámbito de la metrología no es la excepción. En primera instancia, debemos señalar cuatro normas mexicanas muy importantes:

- NMX-Z-055: 1996. IMNC. *Metrología. Vocabulario de términos fundamentales y federales.*
- NOM-008-SCFI-2002. *Sistema General de Unidades de Medida.*

- NMX-EC-17025-IMNC. 2006. *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.*
- NMX-CH-140-IMNC-2002. *Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones.*

Este grupo de normas contienen los elementos legales que debe seguir cualquier metrólogo, sin importar su ámbito de competencia, para realizar mediciones con base en los acuerdos internacionales.

Tipos de metrología

Metrología eléctrica

Tiempo y frecuencia

Tiene la función de establecer, mantener y mejorar los patrones nacionales de tiempo y frecuencia.

Asimismo, es responsable de diseminar la exactitud de estos patrones hacia las actividades productivas del país que requieren de mediciones en estas dos magnitudes de medición. Los laboratorios de esta división son:

- Desarrollo de patrones primarios de frecuencia.
- Generación de las escalas de tiempo.
- Calibración de relojes y osciladores de alta exactitud.
- Diseminación de tiempo.

Mediciones electromagnéticas

Tiene como función el desarrollo, establecimiento, mantenimiento y mejora de los patrones nacionales de las magnitudes eléctricas y magnéticas más importantes para los sectores usuarios en México. Actualmente se han establecido once patrones nacionales en magnitudes electromagnéticas.

Termometría

Prácticamente en todos los sectores industriales se realizan mediciones de temperatura por diversos medios. El control y la medición de temperatura son actividades fundamentales para la determinación de la calidad de los productos de las industrias electrónica, química, farmacéutica, bioquímica, metalúrgica, alimentos y otras. Los usuarios de termómetros de estos sectores requieren de referencias confiables y reconocidas internacionalmente para la calibración de sus instrumentos y para la investigación sobre nuevos métodos de medición y procedimientos que permitan mejorar las mediciones y el control de temperatura.

La división de Termometría (DTR) mantiene la unidad de temperatura, el Kelvin, mediante un conjunto de celdas para la reproducción del punto triple del agua construidas y caracterizadas en sus laboratorios. Asimismo, la DTR mantiene como patrón nacional de temperatura, la reproducción de la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90), en el intervalo

de –180°C hasta 960°C por medio de termometría de resistencia de platino y de 960°C hasta 2 000°C vía termometría de radiación. Los laboratorios de la DTR son los siguientes:

- Termometría de resistencia de platino.
- Termometría de termopares.
- Termometría de radiación.
- Humedad.
- Propiedades termofísicas.

Metrología física

Óptica y radiometría

Esta división se encarga de establecer y mantener los patrones nacionales en los campos de fotometría (la candela), radiometría, espectrofotometría, polarimetría, refractometría, optoelectrónica y fibras ópticas. Entre la gran diversidad de sectores beneficiados por estos patrones se encuentran los sectores de salud, farmacéutico, petroquímico, textil, de pinturas, iluminación y telecomunicaciones, entre otros.

Vibraciones y acústica

Tiene a su cargo los patrones nacionales de aceleración y acústica que, a través de las diferentes cadenas de diseminación, tienen impacto en mediciones que repercuten en la productividad de la planta industrial y en otros campos de actividad, como el comercio, la salud, la seguridad y la higiene en la sociedad. Para ilustrar la variedad de aplicaciones de estas mediciones es posible mencionar como ejemplo la vibración en automóviles y camiones, la vibración de edificios y sismología, las pruebas no destructivas por ultrasonido, la calidad acústica de equipos de audio, los niveles de presión acústica (ruido) en lugares de trabajo y en áreas urbanas, los niveles de sensibilidad auditiva y las aplicaciones médicas del ultrasonido.

Metrología mecánica

Dimensional

La metrología dimensional es básica para la producción en serie y la intercambiabilidad de partes. Con tal propósito esta división tiene a su cargo los patrones nacionales de longitud y ángulo plano.

La unidad de longitud se disemina mediante la calibración de bloques patrón de alto grado de exactitud por medio de un interferómetro. Estos bloques a su vez, calibran otros de menor exactitud, estableciéndose la cadena de trazabilidad que llega hasta las mediciones de los instrumentos de uso industrial común. De esta manera, se les da trazabilidad a partir del patrón nacional a instrumentos y patrones dimensionales de gran importancia industrial, como anillos y tampones patrón, patrones de roscas, galgas de espesores, patrones de forma y posición, artefactos para la calibración de máquinas de medición por coordenadas, mesas de planitud, así como a la verificación de máquinas herramientas, entre otros.

El patrón primario de pequeños ángulos es utilizado para calibrar niveles y autocolimadores, principalmente.

Masa y densidad

Esta división mantiene los patrones nacionales correspondientes a las magnitudes de masa y densidad. Para el desarrollo de sus actividades opera seis laboratorios: Patrón nacional de masa, Patrón nacional de densidad, Patrones de referencia, Pequeñas masas, Densidad de sólidos y Densidad de líquidos.

Fuerza y presión

Esta división es responsable de los patrones de las magnitudes de fuerza, par torsional, dureza, tenacidad, presión absoluta, presión relativa y vacío.

Flujo y volumen

El flujo de fluidos es un fenómeno que se presenta en una gran variedad de procesos industriales, y cuya correcta medición es vital para la economía de numerosas empresas. Por ello, la calibración de medidores y la caracterización de los sistemas de medición de fluidos tienen importantes repercusiones económicas en muchos sectores de la sociedad. Para satisfacer los requerimientos de exactitud en esta magnitud física, en la división de Metrología de flujo y volumen del CENAM se mantienen los patrones nacionales de flujo de gas, flujo de líquidos, volumen y viscosidad.

Metrología de materiales

Materiales metálicos

La división de Materiales metálicos tiene entre sus principales actividades el desarrollo, establecimiento y mantenimiento de los sistemas primarios para la certificación de materiales de referencia primarios que apoyen el establecimiento de la trazabilidad en el país de las mediciones involucradas en el área de química analítica inorgánica.

Materiales cerámicos

Las dos últimas décadas han atestiguado marcados avances en la tecnología de materiales duros no metálicos, por medio del refinamiento de productos existentes y la invención de nuevos. La tendencia moderna al uso de este tipo de materiales en aplicaciones de ingeniería ha orientado las actividades de la división de Materiales cerámicos a la asistencia de la industria nacional mediante el desarrollo de bases propias para determinar las propiedades y el comportamiento de este tipo de materiales, con el fin de mejorar sus bases de diseño, especificación y caracterización.

Materiales orgánicos

Esta división realiza y certifica materiales de referencia relacionados con aplicaciones en salud e higiene industrial, ambiente, alimentos y agricultura, materias primas y productos indus-

triales, combustibles y gases; así como materiales de referencia para propiedades físicas como actividad iónica y propiedades poliméricas.

Proporciona, asimismo, servicios de calibración de analizadores de gases, estudios comparativos de mediciones analíticas, así como desarrollo y validación de métodos analíticos.

Exactitud, precisión, repetibilidad, reproducibilidad

Por lo común se utilizan los términos exactitud y precisión para describir la confiabilidad de las mediciones, y en la práctica se utilizan como sinónimos, lo cual es incorrecto. Las definiciones de estos conceptos son:

Exactitud de medición

Proximidad de la concordancia entre el resultado de una medición y un valor verdadero del mensurando.

Precisión de medición

Proximidad de concordancia entre varias mediciones del mismo mensurando.

El concepto de "exactitud" es cualitativo.

El término "precisión" no debe utilizarse como exactitud.

Podemos ilustrar la diferencia entre estos conceptos mediante los resultados del lanzamiento de dardos en un juego de "tiro al blanco", como se muestra en las siguientes imágenes:

Dado un procedimiento experimental bien descrito para medir alguna característica particular de un sistema químico o físico, y un sistema determinado, se puede entender la precisión como la dispersión exhibida por los resultados obtenidos a través de la aplicación repetida de los procesos a ese sistema. El concepto de precisión se refiere a la concordancia entre mediciones realizadas en condiciones similares o a las mediciones del mismo mensurando hechas por diferentes personas. Esta dispersión se expresa de manera más adecuada en términos de una función de distribución de probabilidad, o con más exactitud en términos de parámetros que miden la dispersión de una distribución de probabilidad.

Precisión | Exactitud | No precisión, no exactitud

Figura 1.5

Con el propósito de eliminar la confusión se definen dos nuevos conceptos, repetibilidad y reproducibilidad, que junto con el término exactitud, describen de mejor manera la confiabilidad de una medición.

Repetibilidad (de los resultados de mediciones)

Proximidad de la concordancia entre los resultados de las mediciones sucesivas del mismo mensurando, con las mediciones realizadas con la aplicación de la totalidad de las siguientes condiciones llamadas condiciones de repetibilidad:

- El mismo procedimiento de medición.
- El mismo observador.
- El mismo instrumento de medición utilizado en iguales condiciones.
- El mismo lugar.
- La repetición dentro de un periodo corto.

La repetibilidad se puede expresar de forma cuantitativa con la ayuda de las características de la dispersión de los resultados.

Reproducibilidad (de los resultados de mediciones)

Proximidad de la concordancia entre los resultados de las mediciones del mismo mensurando, con las mediciones realizadas haciendo variar las condiciones de medición.

Para que una expresión de la reproducibilidad sea válida, es necesario especificar las condiciones que se hacen variar. Éstas pueden ser:

- El principio de medición.
- El método de medición.
- El observador.
- El instrumento de medición.
- El patrón de referencia.
- El lugar.
- Las condiciones de uso.
- El tiempo.

La repetibilidad puede expresarse de modo cuantitativo con la ayuda de las características de la dispersión de los resultados.

Los resultados considerados aquí son, habitualmente, los resultados corregidos.

Sistemas de unidades

Como ya notamos en el resumen histórico de metrología, las diversas culturas desarrollaron sistemas de medición que les permitieron comerciar de forma justa, y a finales del siglo XVIII,

con el desarrollo del sistema métrico decimal –el antecesor del Sistema Internacional de Unidades (SI)–, se inició un proceso en todo el mundo para contar con un solo sistema de mediciones; sin embargo, hasta la fecha, algunos países de habla inglesa aún no concluyen el proceso de implantación del SI, entre ellos, la economía más poderosa del mundo (y principal socio comercial de México), Estados Unidos de América, quien sigue usando el llamado Sistema Inglés, el cual debemos estudiar debido a que todavía existen muchos artículos que se producen utilizando el Sistema Inglés, por ejemplo: llaves de media pulgada, recipientes de un galón, aire acondicionado de 50 000 BTU, etcétera.

Sistema Inglés

El sistema para medir longitudes en Estados Unidos de América se basa en la pulgada, el pie (medida), la yarda y la milla. Cada una de estas unidades tiene dos definiciones ligeramente distintas, lo que ocasiona que existan dos diferentes sistemas de medición.

Una pulgada de medida internacional es exactamente 25,4 mm, mientras que una pulgada de agrimensor de Estados Unidos de América se define para que 39,37 in sean exactamente 1 m. Para la mayoría de las aplicaciones, la diferencia es insignificante (aproximadamente 3 mm por milla). La medida internacional se utiliza para prácticamente todas las aplicaciones (incluyendo ingeniería y comercio), mientras que la de examinación es solamente para agrimensura.

La medida internacional utiliza la misma definición de las unidades que se emplean en el Reino Unido y otros países del Commonwealth. Las medidas de agrimensura utilizan una definición más antigua empleada antes de que en Estados Unidos de América se adoptara la medida internacional:

- 1 pulgada (in) = 25,4 mm
- 1 pie (ft) = 12 in = 30,48 cm
- 1 yarda (yd) = 3 ft = 91,44 cm
- 1 milla (mi) = 1760 yd = 1,609344 km
- 1 rod (rd) = 16,5 ft = 5,0292 m
- 1 furlong (fur) = 40 rd = 660 ft = 201,168 m
- 1 milla = 8 fur = 5280 ft = 1,609347 km

A veces, con fines de agrimensura, se utilizan las unidades conocidas como medidas de cadena de Gunther (o medidas de cadena del agrimensor). Estas unidades se definen a continuación:

- 1 link (li) = 7,92 in = 0,001 fur = 201,168 mm
- 1 chain (ch) = 100 li = 66 ft = 20,117 m

Para medir profundidades del mar, se utilizan los fathoms

- 1 fathom = 6 ft = 1,8288 m

Unidades de área

Las unidades de área en Estados Unidos de América se basan en la pulgada cuadrada (sq in).

- 1 pulgada cuadrada (sq in) = 645,16 mm²
- 1 pie cuadrado (sq ft) = 144 sq in = 929,03 cm²
- 1 rod cuadrado (sq rd) = 272,25 sq ft = 25,316 m²
- 1 acre = 10 sq ch = 1 fur × 1 ch = 160 sq rd = 43 560 sq ft = 4 046,9 m²
- 1 milla cuadrada (sq mi) = 640 acres = 2,59 km²

Unidades de capacidad y volumen

La pulgada cúbica, el pie cúbico y la yarda cúbica se utilizan comúnmente para medir el volumen. Existe también un grupo de unidades para medir volúmenes de líquidos y otro para medir materiales secos.

El pie cúbico, la pulgada cúbica y la yarda cúbica son unidades diferentes a las utilizadas en el Sistema Imperial, aunque sus nombres son similares. Además, el sistema imperial no contempla más que un solo juego de unidades tanto para materiales líquidos como secos.

Volumen en general

- 1 pulgada cúbica (in³ o cu in) = 16,387064 cm³
- 1 pie cúbico (ft³ o cu ft) = 1 728 cu in = 28,317 L
- 1 yarda cúbica (yd³ o cu yd) = 27 cu ft = 7 646 hL
- 1 acre-pie = 43 560 cu ft = 325 851 gallons = 13 277,088 m³

Volumen líquido

- 1 minim (min) = 61,612 µL
- 1 dramo fluido (fl dr) = 60 min = 3 697 mL
- 1 onza fluida (fl oz) = 8 fl dr = 29,574 mL
- 1 gill (gi) = 7,21875 cu in = 4 fl oz = 118,294 mL
- 1 pinta (pt) = 4 gi = 16 fl oz = 473,176 mL
- 1 quinto = 25,6 fl oz = 757,082 mL
- 1 cuarto (qt) = 2 pt = 32 fl oz = 946,353 mL
- 1 galón (gal) = 231 cu in = 4 qt = 128 fl oz = 3,785411784 L

Volumen en seco

- 1 pinta (pt) = 550,610 mL
- 1 cuarto (qt) = 2 pt = 1,101 L
- 1 galón (gal) = 4 qt = 268,8 cu in = 4,405 L
- 1 peck (pk) = 8 qt = 2 gal = 8,81 L
- 1 bushel (bu) = 2150,42 cu in = 4 pk = 35,239 L

Unidades de masa

- 437,5 grano = 1 onza
- 16 onza = 1 libra (7000 grano)

- 14 libra = 1 piedra
- 100 libra = 1 hundredweight [cwt]
- 20 cwt = 1 ton (2000 libra)

Sistema Internacional de Unidades (SI)

En México se adoptó el Sistema Internacional de Unidades como norma oficial mexicana, la NOM-008-SCFI-2002. *Sistema General de Unidades de Medida*.

El Sistema Internacional de Unidades se fundamenta en siete unidades de base correspondientes a las magnitudes de longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura, cantidad de materia e intensidad luminosa. Estas unidades son conocidas como **metro**, **kilogramo**, **segundo**, **ampere**, **kelvin**, **mol** y **candela**, respectivamente.

A partir de estas siete unidades de base se establecen las demás unidades de uso práctico, dos unidades suplementarias, el ángulo plano y el ángulo sólido denominados **radián** y **esterradián**, así como 19 unidades derivadas, asociadas a magnitudes como frecuencia, fuerza, presión, trabajo o energía, potencia, resistencia eléctrica, etcétera.

Tabla 1.1
Unidades base

Parámetro	Unidad SI	Símbolo	Definición
Longitud	metro	m	La longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío en un lapso de 1 / 299 792 458 de segundo (17a. Conferencia General de Pesas y Medidas de 1983).
Masa	kilogramo	kg	La masa igual a la del prototipo internacional del kilogramo (1a. y 3a. Conferencia General de Pesas y Medidas, 1889 y 1901).
Tiempo	segundo	s	La duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado base del átomo de cesio 133 (13a. Conferencia General de Pesas y Medidas, 1967).
Corriente eléctrica	ampere	A	La intensidad de una corriente constante, que mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable, colocados a 1 m de distancia entre sí en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} N/m de longitud (9a. Conferencia General de Pesas y Medidas, 1948).
Temperatura termodinámica	kelvin	K	La fracción 1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (13a. Conferencia General de Pesas y Medidas, 1967).

Continúa

Continuación

Intensidad luminosa	candela	cd	La intensidad luminosa, en una dirección dada de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540 x 10^{12} Hz y cuya intensidad energética en esa dirección es de 1/683 watt por esterradián (16a. Conferencia General de Pesas y Medidas, 1979).
Cantidad de sustancia	mol	mol	La cantidad de materia que contiene tantas unidades elementales como átomos existen en 0,012 kg de carbono 12 (^{12}C) (14a. Conferencia General de Pesas y Medidas, 1971).

Tabla 1.2
Unidades suplementarias

Parámetro	Unidad SI	Símbolo	Definición
Ángulo plano	radián	rad	Es el ángulo plano comprendido entre dos radios de un círculo, y que interceptan sobre la circunferencia de este círculo un arco de longitud igual a la del radio (ISO-31/1).
Ángulo sólido	esterradián	sr	Es el ángulo sólido que tiene su vértice en el centro de una esfera, y que intercepta sobre la superficie de esta esfera un área igual a la de un cuadrado que tiene por lado el radio de la esfera (ISO-31/1).

Tabla 1.3
Unidades derivadas

Parámetro	Unidad SI	Símbolo	Definición
Frecuencia	hertz	Hz	1/s
Fuerza	newton	N	kg·m/s^2
Presión	pascal	Pa	N/m^2
Trabajo o energía	joule	J	N m
Potencia	watt	W	J/s
Potencial eléctrico	volt	V	W/A
Resistencia eléctrica	ohm	ohm	V/A
Cantidad de carga	coulomb	C	A s
Capacitancia	farad	F	C/V
Conductancia eléctrica	siemens	S	A/V
Flujo magnético	weber	Wb	V·s
Densidad de flujo magnético	tesla	T	Wb/m^2
Inductancia	henry	H	Wb/A
Temperatura Celsius	grado	°C	K
Flujo luminoso	lumen	lm	cd·sr

Continúa

Continuación

Luminosidad	lux	lx	lm/m^2
Actividad nuclear	becquerel	Bq	1/s
Dosis absorbida	gray	Gy	J/kg
Dosis equivalente	sievert	Sv	m^2/s^2

La Ley Federal sobre Metrología y Normalización establece que el SI es el sistema de unidades oficial en México. Hay unidades que no pertenecen al SI pero que se conservan. También hay otras que sin pertenecer al SI, pueden usarse temporalmente. Y, hay unidades que no pertenecen al SI y que ya no deben utilizarse.

Tabla 1.4
Unidades que no pertenecen al SI, pero que se conservan

Magnitud	Unidad	Símbolo	Equivalente
Tiempo	minuto hora día año	min h d a	1 min = 60 s 1 h = 60 min = 3 600 s 1 d = 24 h = 86 400 s 1 a = 365,242 20 d = 31 556 926 s
Tiempo	grado minuto segundo	° ′ ″	1° = (π/180) rad 1′ = (π/10 800) rad 1″ = (π/648 000) rad
Volumen Masa Trabajo, energía Masa	litro tonelada electronvolt unidad de masa atómica	l, L t eV u	$1\ L = 10^{-3}\ m^3$ $1\ t = 10^3\ kg$ $1\ eV = 1{,}602\ 177 \times 10^{-19}\ J$ $1\ u = 1{,}660\ 540 \times 10^{-27}\ kg$

Tabla 1.5
Unidades que no pertenecen al SI pero que pueden usarse temporalmente

Magnitud	Unidad	Símbolo	Equivalencia
Superficie	área hectárea barn	a ha b	$1\ a = 10^2\ m^2$ $1\ ha = 10^4\ m^2$ $1\ b = 10^{-28}\ m^2$
Longitud	angström	Å	$1\ Å = x\ 10^{-10}\ m$
Longitud	milla náutica		1 milla náutica = 1852 m
Presión	bar	bar	1 bar = 100 kPa
Velocidad	nudo		1 nudo = (0,514 44) m/s
Dosis de radiación	röntgen	R	$1\ R = 2{,}58 \times 10^{-4}\ C/kg$

Continúa

Continuación

Dosis absorbida	rad*	rad (rd)	1 rad = 10^{-2} Gy
Radiactividad	curie	Ci	1 Ci = 3,7 x 10^{10} Bq
Aceleración	gal	gal	1 gal = 10^{-2} m/s^2
Dosis equivalente	rem	rem	1 rem = 10^{-2} Sv

* El rad es una unidad especial empleada para expresar dosis absorbida de radiaciones ionizantes. Cuando haya riesgo de confusión con el símbolo del radián, se puede emplear rd como símbolo del rad.

Tabla 1.6
Ejemplos de unidades que no deben utilizarse

Magnitud	Unidad	Símbolo	Equivalencia
Longitud	fermi	fm	10^{-15} m
Longitud	unidad X	unidad X	1,002 x 10^{-4} nm
Volumen	stere	st	1 m^3
Masa	quilate métrico	CM	2 x 10^{-4} kg
Fuerza	kilogramo-fuerza	kgf	9,806 65 N
Presión	torr	Torr	133,322 Pa
Energía	caloría	cal	4,186 8 J
Fuerza	dina	dyn	10^{-5} N
Energía	erg	erg	10^{-7} J
Luminancia	stilb	sb	10^4 cd/m^2
Viscosidad dinámica	poise	P	0,1 Pa·s
Viscosidad cinemática	stokes	St	10^{-4} m^2/s
Luminosidad	phot	ph	10^4 lx
Inducción	gauss	Gs, G	10^{-4} T
Intensidad campo magnético	oersted	Oe	(1000 / 4π) A/m
Flujo magnético	maxwell	Mx	10^{-8} Wb
Inducción	gamma		10^{-9} T
Masa	gamma		10^{-9} kg
Volumen	lambda		10^{-9} m^3
Temperatura	grado centígrado		1 °C

Conversión de unidades

En la práctica profesional es muy frecuente convertir unidades equivalentes del Sistema Inglés al Sistema Internacional o convertir unidades dentro del mismo sistema. Estas operaciones deben realizarse de manera muy cuidadosa, ya que si se cometen errores, éstos podrían ser

muy costosos o catastróficos, por ejemplo, la noticia que divulgó la empresa televisiva BBC de Londres el viernes 24 de septiembre de 1999:

> *"Los potentes radiotelescopios de la Red de Comunicación y Rastreo de Sondas Interplanetarias de la NASA están llevando a cabo un último registro de las inmediaciones de Marte en un intento desesperado de recuperar la nave".*

La nave es el *Mars Climate Orbiter*, satélite meteorológico que la NASA envió a Marte para estudiar los fenómenos atmosféricos de ese planeta. Luego de un viaje de 10 meses desde la Tierra el satélite debería haberse puesto en órbita a 200 km de altura sobre la superficie de Marte. Dos días antes de la maniobra, los instrumentos de navegación indicaban que la trayectoria de la nave la llevaría más bien a una altura de 150 km, cifra aún aceptable.

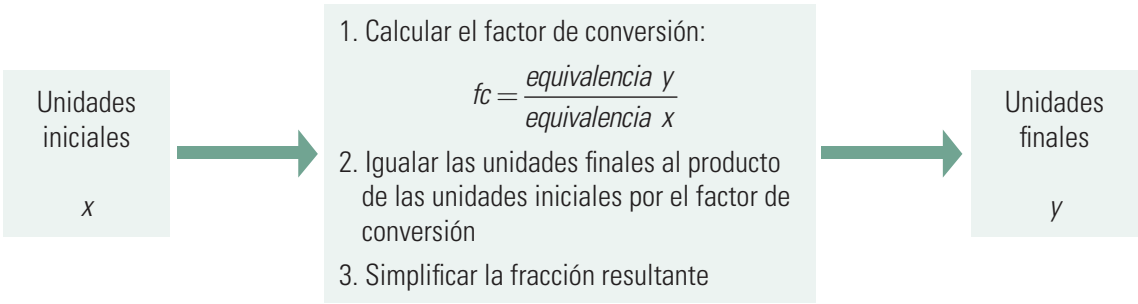
Pero el *Mars Climate Orbiter* pasó a sólo 60 km de la superficie. A esa altura la fricción con la atmósfera del planeta empezó a sacudir y calentar el aparato. La nave se hizo pedazos y por breves instantes fue una estrella fugaz que surcó el cielo marciano.

¿El error? Un programa de computadora encargado de controlar una de las maniobras de corrección de curso que hizo el satélite antes de llegar a Marte estaba diseñado para hacer cálculos con unidades de medida del Sistema Inglés. La NASA había pedido al fabricante que usara el Sistema Internacional de Unidades.

La confusión de unidades de medida le costó a la NASA 125 millones de dólares… además de la vergüenza.

Regla para conversión de unidades

Conversión entre unidades base



Ejemplo. Convertir 3,2 millas a metros.

1. Calcular el factor de equivalencia, en el numerador se escribe la equivalencia en metros y en el denominador la equivalencia en millas:

$$fc = \frac{1609,3441\ \text{m}}{1\ \text{milla}}$$

2. Igualar las unidades finales al producto de las unidades iniciales por el factor de conversión:

$$y = (fc)(x) = \left(\frac{1609,3441\ \text{m}}{1\ \text{milla}}\right)(3.2\ \text{millas})$$

3. Simplificar la fracción resultante:

$$y = 5\,149{,}901\ \text{m}$$

Por tanto, 3,2 milla equivalen a 5 149,901 m .

Conversión entre unidades derivadas

Unidades iniciales

x

→

1. Calcular tantos factores de conversión como unidades base tenga la unidad derivada:

$$fc_i = \frac{equivalencia\ U_i}{equivalencia\ V_i}$$

2. Igualar las unidades finales al producto o cociente de las unidades iniciales por los factores de conversión, según aparezcan las unidades base
3. Simplificar la fracción resultante

→

Unidades finales

y

Ejemplo. Convertir la velocidad $50\,\frac{\text{milla}}{\text{h}}$ a su equivalente en $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

1. Calcular los factores de equivalencia:

$$fc_1 = \frac{1\,609,3441\ \text{m}}{1\ \text{milla}}$$

$$fc_2 = \frac{3\,600\ \text{s}}{1\ \text{h}}$$

2. Igualar las unidades finales al producto de las unidades iniciales por los factores de conversión:

$$y = \frac{fc_1}{fc_2}x = \left(\frac{1\,609,344\,\frac{\text{m}}{1\ \text{milla}}}{3\,600\,\frac{s}{1\ h}}\right)\left(50\,\frac{\text{milla}}{\text{h}}\right)$$

$$y = \frac{(1\,609,344\ \text{m})(1\ \text{h})}{(3\,600\ \text{s})(1\ \text{milla})}\left(50\,\frac{\text{milla}}{\text{h}}\right) = \left(\frac{1\,609,344}{3600}\right)\left(50\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$$

$$y = 22,352\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Por tanto, una velocidad de $50\,\frac{\text{milla}}{\text{h}}$ equivale a una velocidad de $22{,}352\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Adicionalmente nos podemos auxiliar de las siguientes tablas para realizar conversiones.

Conversiones en el Sistema Internacional de Unidades (SI)

Las conversiones entre unidades del SI son relativamente sencillas, ya que en cada magnitud sólo se requiere multiplicar por múltiplos o submúltiplos de 10, de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 1.7
Conversiones en el Sistema Inglés

Longitud	Área
12 pulgadas = 1 pie 3 pies = 1 yarda 220 yardas = 1 furlong 8 furlongs = 1 milla 5 280 pies = 1 milla 1 760 yardas = 1 milla	144 pulgadas cuadradas = 1 pie cuadrado 9 pies cuadrados = 1 yarda cuadrada 4 840 yardas cuadradas = 1 acre 640 acres = 1 milla cuadrada 1 milla cuadrada = 1 sección
Volumen	
1 728 pulgadas cúbicas = 1 pie cúbico 27 pies cúbicos = 1 yarda cúbica	
Capacidad (seco)	**Capacidad (fluido)**
2 pintas = 1 cuarto 8 cuartos = 1 peck 4 pecks = 1 bushel	16 onzas de fluido = 1 pinta 4 gills = 1 pinta 2 pintas = 1 cuarto 4 cuartos = 1 galón (8 pintas)
Masa	
437,5 granos = 1 onza 16 onzas = 1 libra (7000 grano) 14 libras = 1 piedra 100 libras = 1 hundredweight [cwt] 20 cwts = 1 ton (2 000 libra)	

Tabla 1.8
Prefijos para formar múltiplos y submúltiplos

Nombre	Símbolo	Valor
yotta	Y	10^{24} = 1 000 000 000 000 000 000 000 000
zetta	Z	10^{21} = 1 000 000 000 000 000 000 000

Continúa

Continuación

exa	E	10^{18} = 1 000 000 000 000 000 000
peta	P	10^{15} = 1 000 000 000 000 000
tera	T	10^{12} = 1 000 000 000 000
giga	G	10^{9} = 1 000 000 000
mega	M	10^{6} = 1 000 000
kilo	k	10^{3} = 1 000
hecto	h	10^{2} = 100
deca	da	10^{1} = 10
deci	d	10^{-1} = 0,1
centi	c	10^{-2} = 0,01
mili	m	10^{-3} = 0,001
micro	μ	10^{-6} = 0,000 001
nano	n	10^{-9} = 0,000 000 001
pico	p	10^{-12} = 0,000 000 000 001
femto	f	10^{-15} = 0,000 000 000 000 001
atto	a	10^{-18} = 0,000 000 000 000 000 001
zepto	z	10^{-21} = 0,000 000 000 000 000 000 001
yocto	y	10^{-24} = 0,000 000 000 000 000 000 000 001

Adicionalmente, el Sistema Internacional de Unidades (SI) establece reglas generales para la escritura de los símbolos de las unidades del SI:

1. Los símbolos de las unidades deben expresarse en caracteres romanos, en general, minúsculas, con excepción de los símbolos que se derivan de nombres propios, en los cuales se utilizan caracteres romanos en mayúsculas.
   Ejemplos: m, cd, K, A.
2. No se debe colocar punto después del símbolo de la unidad
3. Los símbolos de las unidades no deben pluralizarse
   Ejemplos: 8 kg, 50 kg, 9 m, 5 m.
4. El signo de multiplicación para indicar el producto de dos o más unidades debe ser preferentemente un punto. Este punto puede suprimirse cuando la falta de separación de los símbolos de las unidades que intervengan en el producto no se preste a confusión.
   Ejemplos: N·m o Nm, también m·N pero no mN que se confunde con milinewton, submúltiplo de la unidad de fuerza, con la unidad de momento de una fuerza o de un par (newton metro).
5. Cuando una unidad derivada se forma por el cociente de dos unidades, se puede utilizar una línea inclinada, una línea horizontal o bien potencias negativas.
   Ejemplo: m/s o ms^{-1} para designar la unidad de velocidad: metro por segundo.
6. No debe utilizarse más de una línea inclinada a menos que se agreguen paréntesis. En los casos complicados, deben utilizarse potencias negativas o paréntesis.

Ejemplos: m/s^2 o $m \cdot s^{-2}$, pero no: m/s/s
$m \cdot kg / (s^3 \cdot A)$ o $m \cdot kg.s^{-3} \cdot A^{-1}$, pero no $m \cdot kg/s^3/A$

7. Los múltiplos y submúltiplos de las unidades se forman anteponiendo al nombre de éstas, los prefijos correspondientes con excepción de los nombres de los múltiplos y submúltiplos de la unidad de masa en los cuales los prefijos se anteponen a la palabra "gramo".
   Ejemplo: dag, Mg (decagramo; megagramo)
   ks, dm (kilosegundo; decímetro)
8. Los símbolos de los prefijos deben ser impresos en caracteres romanos (rectos), sin espacio entre el símbolo del prefijo y el símbolo de la unidad.
   Ejemplo: mN (milinewton), y no m N
9. Si un símbolo que contiene un prefijo está afectado de un exponente, indica que el múltiplo de la unidad está elevado a la potencia expresada por el exponente.
   Ejemplo: $1\ cm^3 = (10^{-2}\ m)^3 = 10^{-6}\ m^3$
   $1\ cm^{-1} = (10^{-2}\ m)^{-1} = 10^2\ m^{-1}$
10. Los prefijos compuestos deben evitarse.
    Ejemplo: 1 nm (un nanómetro), pero no 1 mμm (un milimicrómetro).
    Adicionalmente, deben utilizarse las siguientes reglas para la escritura de los números y su signo decimal.

Números

Los números deben imprimirse generalmente en tipo romano. Para facilitar la lectura de números con varios dígitos, éstos deben separarse en grupos apropiados preferentemente de tres, contando del signo decimal a la derecha y a la izquierda, los grupos deben separarse por un pequeño espacio, nunca con una coma, un punto o por otro medio.

Signo decimal

El signo decimal debe ser una coma sobre la línea (,). Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero.

Conversión de sistema a sistema

La unidad de longitud del SI es el metro. Para cambiar cualquier unidad de longitud en su valor equivalente en metros, utilice el factor de conversión de la tabla siguiente.

Tabla 1.9

angstrom	divida entre 10 000 000 000
centímetro	× 0,01
pie	× 0,3048
furlong	× 201,168
pulgada	× 0,0254
kilómetro	× 1000

Continúa

Continuación

año luz	× 9 460 500 000 000 000
metro [m]	1
micrón (=micrómetros)	× 0,000 001
milla	× 1609,344
milla (náutica)	× 1852
pica (computadora)	× 0,004 233 333
pica (impresoras)	× 0,004 217 518
punto (computadora)	× 0,000 352 777 8
punto (impresoras)	× 0,000 351 459 8
yarda	× 0,9144

La unidad de área del SI es el metro cuadrado. Para cambiar cualquier unidad de área en su valor equivalente en metros cuadrados, utilice el factor de conversión de la tabla siguiente.

Tabla 1.10	
acre	× 4 046,856 422 4
hectárea	× 10 000
centímetro cuadrado	× 0,000 1
pie cuadrado	× 0,092 903 04
pulgada cuadrada	× 0,000 645 16
kilómetro cuadrado	× 1 000 000
metro cuadrado	1
milla cuadrada	× 2 589 988,110 336
milímetro cuadrado	× 0,000 001
yarda	× 0,836 127 36

La unidad de volumen del SI es el metro cúbico. Sin embargo, el metro cúbico es menos utilizado que el litro ($1\ m^3 = 1000\ L$). Para cambiar cualquier unidad de volumen en su valor equivalente en litros, utilice el factor de conversión de la tabla siguiente.

Tabla 1.11	
barril (petróleo)	× 158,987 294 928
bushel (US)	× 35,239 070 166 88
centilitro	× 0,01
centímetro cúbico	× 0,001
decímetro cúbico	1
decámetro cúbico	× 1 000 000

Continúa

Continuación

pie cúbico	× 28,316 846 592
pulgada cúbica	× 0,016 387 064
metro cúbico	× 1000
milímetro cúbico	× 0,000 001
yarda cúbica	× 764,554 857 984
decilitro	x 0,1
onza, líquidos(US)	x 0,029 573 529 562 5
galón, secos (US)	x 4,404 883 770 86
galón, líquidos (US)	x 3,785 411 784
litro [l o L]	1
mililitro	× 0,001
pinta, secos(US)	× 0,550 610 471 357 5
pinta, líquidos (US)	× 0,473 176 473
cuarto, secos (US)	× 1,101 220 942 715
cuarto, líquidos (US)	× 0,946 352 946

La unidad de masa del SI es el **kilogramo**. Para cambiar cualquier unidad de masa en su valor equivalente en kilogramos, utilice el factor de conversión de la tabla siguiente.

Tabla 1.12

grano	× 0,000 064 798 91
gramo	× 0,001
kilogramo [kg]	1
onza, troy	× 0,031 103 476 8
libra	× 0,453 592 37
piedra	× 6,350 293 18
toneladas	× 1000

La unidad de temperatura del SI es el **kelvin**. Sin embargo, con más frecuencia se utiliza el **grado Celsius**, que es del mismo tamaño que el grado kelvin. Para cambiar los grados Fahrenheit a Celsius o viceversa, utilice la expresión indicada en la tabla siguiente.

Tabla 1.13

Para cambiar una temperatura dada en Fahrenheit (F) a Celsius (°C) Inicie con (F), reste 32, multiplique por 5, divida entre 9. La respuesta es (°C)
Para cambiar una temperatura dada en Celsius (°C) a Fahrenheit (F) Inicie con (°C), multiplique por 9, divida entre 5, sume 32. La respuesta es (F).

La unidad de energía o trabajo del SI es el **joule**. Para cambiar cualquier unidad de energía o trabajo en su valor equivalente en joules, utilice el factor de conversión de la tabla siguiente.

Tabla 1.14

British thermal units (BTU)	× 1055,056
caloría	× 4,1868
caloría (alimentos)	× 4 186 (aprox.)
erg	divide entre 10 000 000
gigajoule [GJ]	× 1 000 000 000
caballo de fuerza hora	× 2 684 520 (aprox.)
joules [J]	1
kilocaloría	× 4186,8
kilogramo-fuerza metro	× 9,806 65
kilojoule [kJ]	× 1 000
kilowatt hora [kWh]	× 3 600 000
megajoule [MJ]	× 1 000 000
newton metro [Nm]	× 1
watt segundo [Ws]	1
watt hora [Wh]	× 3 600

▶ RESUMEN

En este capítulo se hace énfasis en la importancia que tiene el desarrollo de la metrología en la competitividad de las empresas de cualquier tipo y en el desarrollo de las naciones.

Se presentó un modelo de medición que comprende las siguientes etapas: definición, realización, diseminación y medición.

Además, se mencionó la existencia en México de la *Ley Federal sobre Metrología y Normalización*, que es un documento básico para quienes estén involucrados en cualquier proceso de medición. De esta ley emana la creación del Centro Nacional de Metrología, organismo responsable de la realización y diseminación de todas las unidades, es decir, en dicho centro deben desarrollarse y resguardarse los patrones nacionales y el origen de todas las cadenas de trazabilidad. Asimismo, se habló de la importancia del desarrollo de estándares y normas para conformar un sistema de medición confiable.

Se definió el importante concepto de *trazabilidad*, indispensable para la diseminación correcta de todas las unidades.

Se presentó una clasificación de la metrología basada en la estructura orgánica del Centro Nacional de Metrología.

Se presentaron los sistemas de unidades: Sistema Inglés y el Sistema Internacional de Unidades, así como las técnicas para la conversión de unidades entre sistemas. Se establecieron las reglas para la adecuada expresión de las unidades del SI.

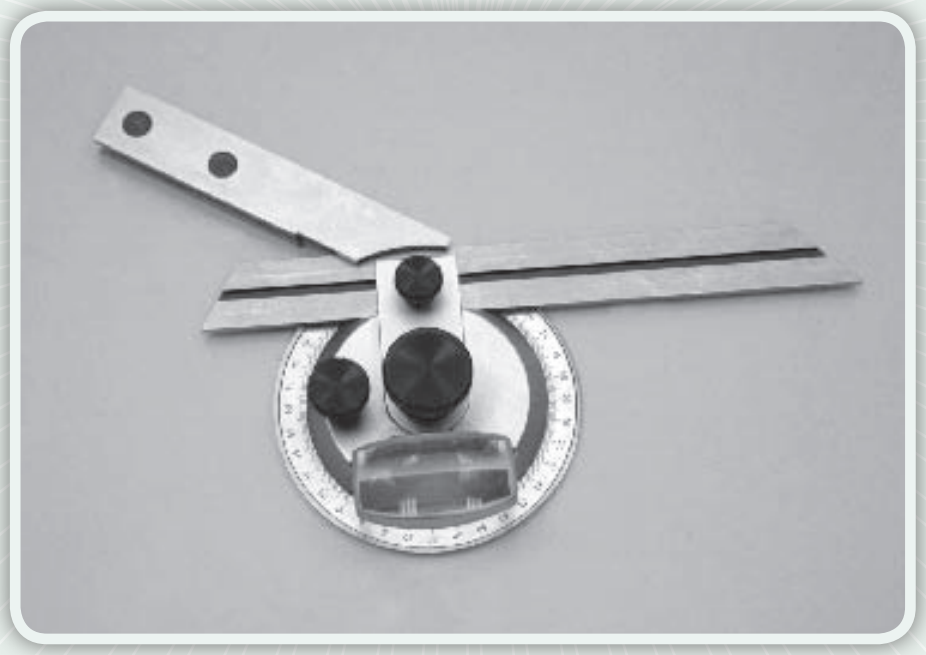
▶ BIBLIOGRAFÍA

- Ley Federal sobre Metrología y Normalización NMX-Z-055: 1996. IMNC. *Metrología-Vocabulario de Términos Fundamentales y Generales.*
- NOM-008-SCFI: 2002. *Sistema General de Unidades de Medida.*
- NMX-EC-17025-IMNC: 2006. *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.*
- NMX-CH-140-IMNC: 2002. *Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones.*

CAPÍTULO

2

Instrumentos de medición dimensional



Tipos de instrumentos de medición dimensional
Manejo de los instrumentos de medición dimensional
Resumen
Bibliografía

Tipos de instrumentos de medición dimensional

Antes de estudiar los tipos de instrumentos de medición es importante conocer el concepto de metrología dimensional.

> **Metrología dimensional**. Estudia las técnicas de medición que determinan correctamente las magnitudes lineales, angulares y acabado superficial.

El *Vocabulario de Términos Fundamentales y Generales* (NMX-Z-055: 1996 IMNC) define el proceso de medición como:

> **Medición**. Conjunto de operaciones que tienen por objeto determinar el valor de una magnitud.

En esta obra definiremos un instrumento de medición de la siguiente manera:

> **Instrumento de medición.** Dispositivo destinado a ser utilizado para hacer mediciones, solo o asociado a uno o varios dispositivos anexos.
> Representa una serie de elementos interrelacionados que constituye la trayectoria de la señal medida, que inicia con un sensor (entrada) y termina en un indicador (salida). Este último dará el resultado de la medición o de un valor relacionado directamente con la variable de entrada, a través de una escala u otro indicador numérico de salida. Un instrumento de medición es un equipo, aparato o máquina que realiza la lectura de una propiedad (o característica) de una variable aleatoria; la procesa, la traduce y la hace entendible al analista encargado de la medición.

La mayoría de los instrumentos básicos de medición lineal o de propósitos generales están representados por la regla de acero, el vernier, el micrómetro, o combinaciones de éstos. Las reglas de acero son usadas efectivamente como mecanismos de medición lineal, lo que significa que para medir una dimensión, se debe alinear con las graduaciones de la escala cuya longitud es leída directamente. Las reglas de acero se pueden encontrar en reglas de profundidad, para medir profundidades de ranuras, hoyos, etc. También son incorporadas a los calibradores deslizables donde son adaptados para operaciones de medición final, que a menudo son más precisos y fáciles de aplicar que una línea de medición.

Reglas para efectuar mediciones

Para hacer mediciones confiables es necesario preparar de manera adecuada los instrumentos de medición, así como los objetos a medir. Algunos pasos que deben realizarse para llevar a cabo una medición confiable son los siguientes:

1. Emplear el instrumento que corresponde a la precisión exigida.
2. Mirar siempre verticalmente sobre el lugar de lectura.

3. Limpiar las superficies del material y el instrumento de medición antes de hacer las mediciones.
4. Retirar la rebaba de las piezas de trabajo antes de la medición.
5. En mediciones de alta exactitud, prestar atención a la temperatura de referencia.
6. En algunos instrumentos de medición, cuidar que la presión de medición sea exacta. No se debe emplear jamás la fuerza.
7. No hacer mediciones en piezas de trabajo en movimiento o en máquinas en marcha.
8. Verificar los instrumentos de medición regulables repetidas veces respecto a su posición a cero.
9. Verificar en determinados intervalos los instrumentos de medición respecto a su precisión de medición.
10. Verificar el estado de calibración del instrumento de medición.

Los instrumentos y aparatos de medición en metrología dimensional se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Lineal
  - Medida directa
    - Con trazos o divisiones
      - Metro
      - Regla graduada
      - Calibradores y medidores de altura con escala vernier
    - Con tornillo micrométrico
      - Micrómetros
      - Cabezas micrométricas
    - Con dimensión fija
      - Bloques patrón
      - Calibradores de espesores (lainas)
      - Calibradores límite (pasa-no pasa)
  - Medida indirecta
    - Comparativa
      - Comparadores mecánicos
      - Comparadores ópticos
      - Comparadores neumáticos
      - Comparadores electromecánicos
      - Máquina de medición de redondez
      - Medidores de espesor de recubrimiento
    - Trigonométrica
      - Esferas o cilindros
      - Máquina de medición por coordenadas
    - Relativa
      - Niveles
      - Reglas ópticas
      - Rugosímetros

Manejo de los instrumentos de medición dimensional

Calibradores con vernier

El calibrador es un instrumento de precisión usado para medir pequeñas longitudes (centésimas de milímetros) de diámetros externos, internos y profundidades, en una sola operación. Fue inventado en 1631 por Pierre Vernier para interpretar con mayor aproximación las fracciones decimales (de longitudes o ángulos) gracias a subdivisiones lineales o fracciones de arco. Al vernier suele llamársele también "nonio" en honor del científico portugués Pedro Nunes (1492?-1577), quien inventó un sistema de lecturas a base de círculos concéntricos que dividen la circunferencia en *n* partes iguales, es decir, 89, 88, 87, etc., con las que lograba mayor aproximación en las lecturas de ángulos; a ambos dispositivos suele llamárseles indistintamente "nonio" o "vernier", a pesar de ser tan distintos entre sí.

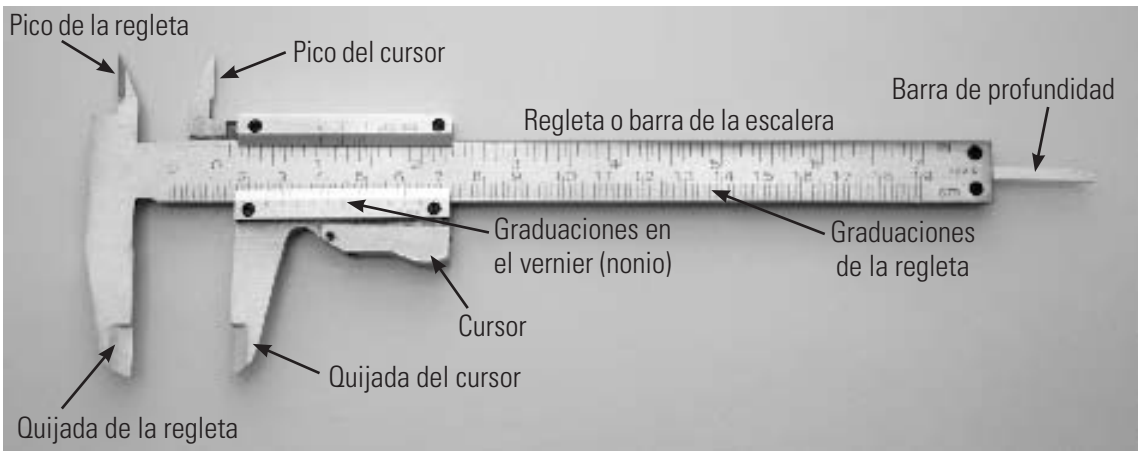


Figura 2.1 *Calibrador de vernier de "modelo de mauser o pie de rey".*

El principio de Vernier puede aplicarse para aumentar la aproximación y consta de una escala principal y una de vernier. El calibrador de vernier de "modelo de mauser o pie de rey" tiene capacidad para tomar medidas interiores, exteriores y de profundidad (figura 1.1). Se conocerán los calibradores con aproximación de 0,05 mm, 0,02 mm, 1/128 in y 0,001 in.

El calibrador tiene generalmente tres secciones de medición (figura 2.2).

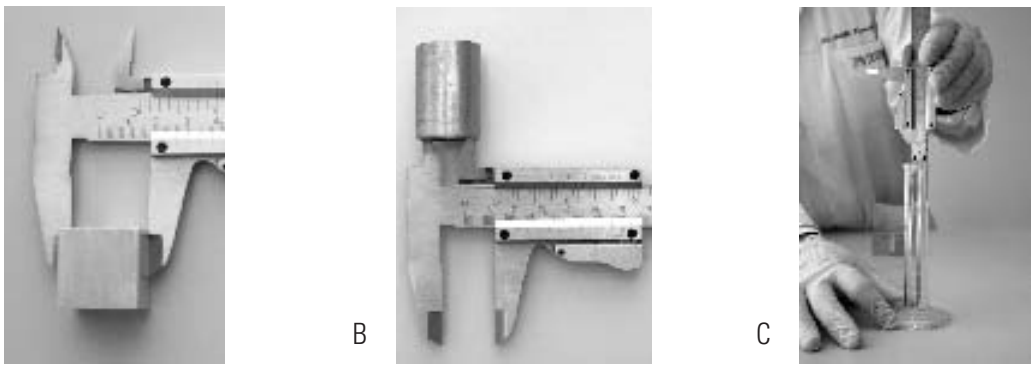


Figura 2.2 *Secciones de medición de un calibrador con vernier.*

A = para medir dimensiones exteriores.
B = para medir dimensiones interiores.
C = para medir profundidad.

Las siguientes longitudes de calibradores se usan ampliamente:
Sistema métrico: 150 mm, 200 mm, 300 mm
Sistema inglés: 6 in, 8 in, 12 in

Tipos de calibradores

Calibrador con vernier con botón

Este calibrador está equipado con un botón en lugar del tradicional tornillo de freno.

Si el botón se oprime, el cursor puede deslizarse a lo largo de la regleta, cuando el botón se suelta, el cursor se detiene automáticamente (figura 2.3).

Figura 2.3 *Calibrador con vernier con botón.*

Calibrador con vernier con tornillo de ajuste

Está equipado con un tornillo de ajuste que se utiliza para mover el cursor lentamente cuando se usa como un calibrador fijo y permite el ajuste fácil del cursor (figura 2.4).

Figura 2.4 *Calibrador con vernier con tornillo de ajuste.*

Calibrador con vernier de carátula

La escala de la regla del calibrador de la carátula está graduada sólo en incrementos de 0,10 in, la carátula está graduada en 100 o en 200 divisiones. En la carátula de 100 divisiones, la aguja da una revolución completa por cada movimiento de 0,10 in de la mordaza deslizante a lo largo de la regla, una aproximación máxima de 0,001 in. Como este calibrador es de lectura directa, no hay necesidad de determinar la línea coincidente de una escala de vernier, lo que facilita la lectura de los instrumentos.

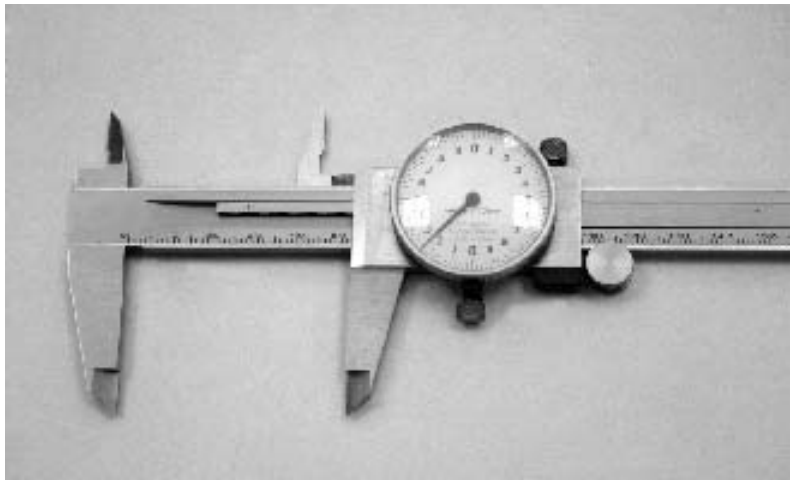


Figura 2.5 *Calibrador con carátula.*

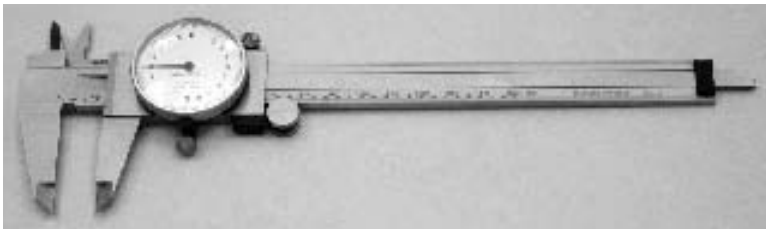


Figura 2.6 *Calibrador con vernier de carátula.*

Este tipo, llamado calibrador de carátula, está equipado con un indicador de carátula en lugar de un nonio para permitir la fácil lectura de la escala (figuras 2.5 y 2.6).

Precauciones al medir

A continuación se detallan los pasos que se deben considerar al momento de medir:

Paso 1. Verificar que el calibrador no esté dañado

Si el calibrador es manejado frecuentemente con rudeza, se inutilizará antes de completar su vida normal de servicio. Para mantenerlo siempre útil tome las precauciones siguientes:

a) Antes de efectuar las mediciones, limpie de polvo y suciedad las superficies de medición, cursor y regleta; particularmente remueva el polvo de las superficies deslizantes, ya que el polvo puede obstruir a menudo el deslizamiento del cursor.
b) Cerciórese de que las superficies de medición de las quijadas y los picos estén libres de dobleces o despostilladuras.
c) Verifique que las superficies deslizantes de la regleta estén libres de daño.

Para obtener mediciones correctas verifique que la herramienta esté acomodada de la siguiente manera:

a) Cuando el cursor esté completamente cerrado, el cero de la escala de la regleta y del nonio deben estar alineados uno con otro (figura 2.7).
   Al verificar las superficies de medición de las quijadas y los picos tenga en cuenta los siguientes puntos:
   - Si no pasa luz entre las superficies de contacto de las quijadas, el contacto es correcto.
   - El contacto de los picos es mejor si una banda uniforme de luz pasa a través de las superficies de medición.
b) Coloque el calibrador hacia arriba sobre una superficie plana, con el medidor de profundidad hacia abajo; empuje el medidor de profundidad, si las graduaciones cero en la regleta y la escala del nonio están desalineadas, el medidor de profundidad está anormal (figura 2.8).
c) Verifique que el cursor se mueva suavemente (pero no de manera holgada) a lo largo de la regleta.

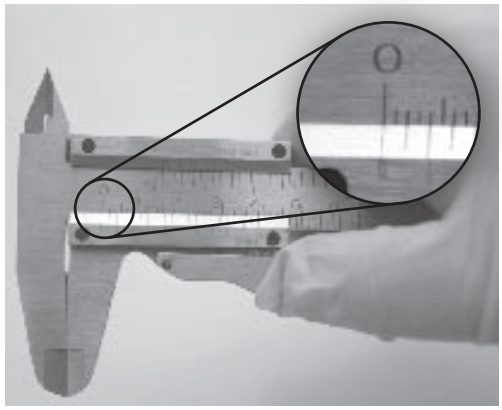


Figura 2.7 *Verificando el contacto nivelado.*

Figura 2.8 *Verificando el medidor de profundidad.*

Paso 2. Ajustar el calibrador correctamente sobre el objeto que se está midiendo

Coloque el objeto sobre el banco y mídalo, sostenga el calibrador en ambas manos, ponga el dedo pulgar sobre el botón y empuje las quijadas del nonio contra el objeto a medir, aplique sólo una fuerza suave (figura 2.9).

Figura 2.9 *Método correcto de manejar los calibradores.*

Medición de exteriores

Coloque el objeto tan profundo como sea posible entre las quijadas (figura 2.10).

a) b)

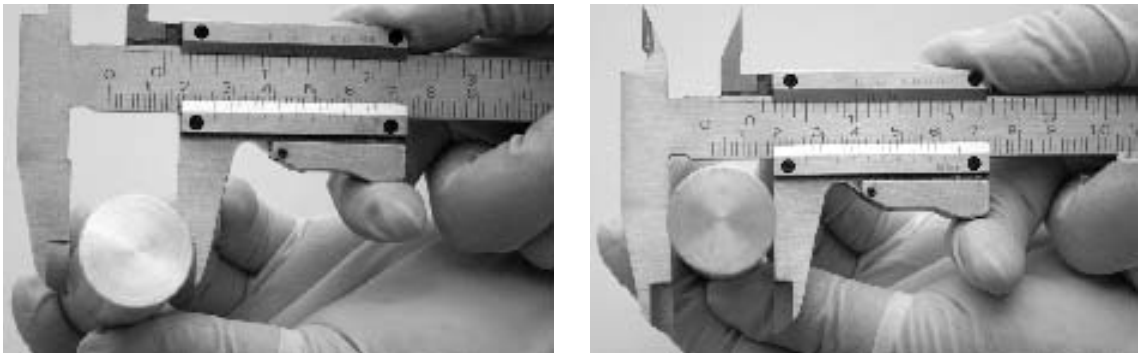


Figura 2.10 *a) Forma incorrecta de colocar un objeto en el vernier. b) Forma correcta de colocar un objeto en el vernier.*

Si la medición se hace al extremo de las quijadas, el cursor podría inclinarse resultando una medición inexacta (figura 2.11).

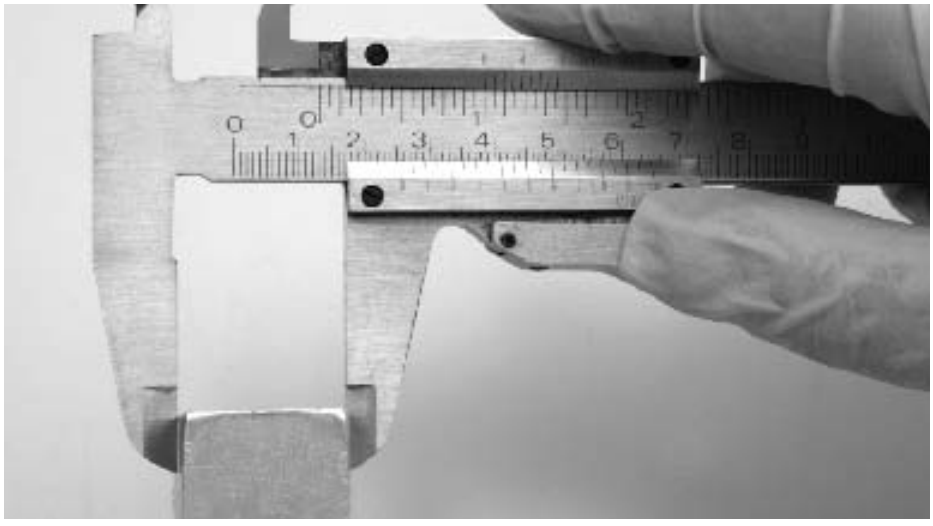


Figura 2.11 *Objeto colocado en el extremo de las quijadas de un vernier.*

Sostenga el objeto a escuadra con las quijadas como se indica en A y B, de otra forma no se obtendrá una medición correcta.

A)

B)

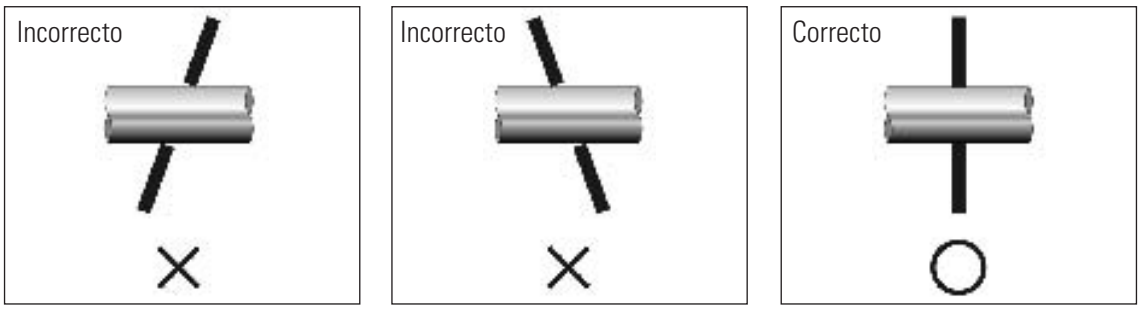


Figura 2.12 *Ejemplos de métodos de medición correctos e incorrectos.*

Medición de interiores

En esta medición es posible cometer errores a menos que se lleve a cabo muy cuidadosamente. Introduzca los picos totalmente dentro del objeto que se medirá, asegurando un contacto adecuado con las superficies de medición y tome la lectura (figura 2.13).

a) b)

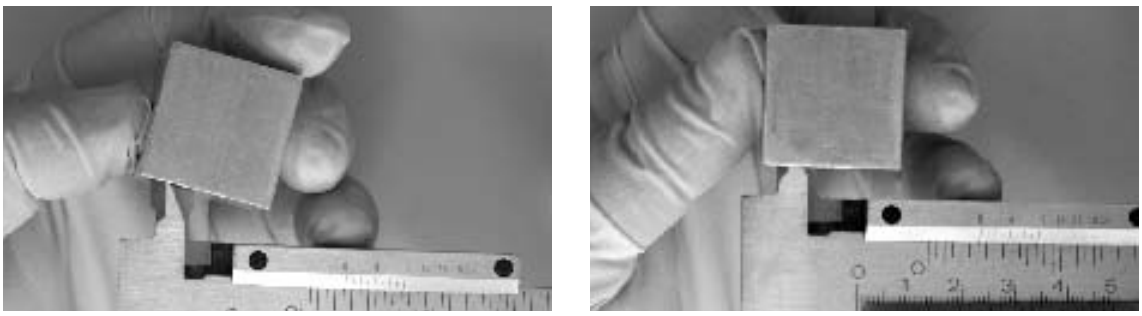


Figura 2.13 *a) Forma incorrecta de formar una medición de interiores. b) Forma correcta de tomar una medición de interiores.*

Al medir el diámetro interior de un objeto tome el valor máximo (figura 2.14), y al medir el ancho de una ranura tome el valor mínimo (figura 2.14).

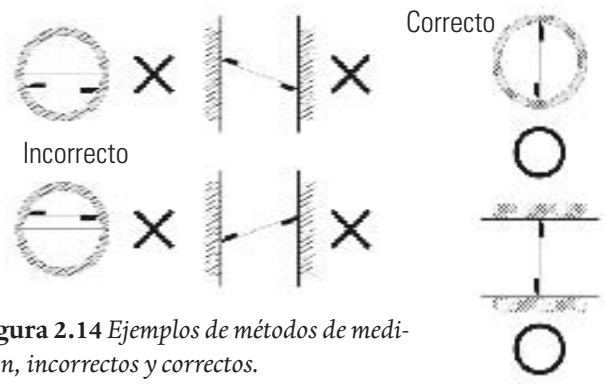


Figura 2.14 *Ejemplos de métodos de medición, incorrectos y correctos.*

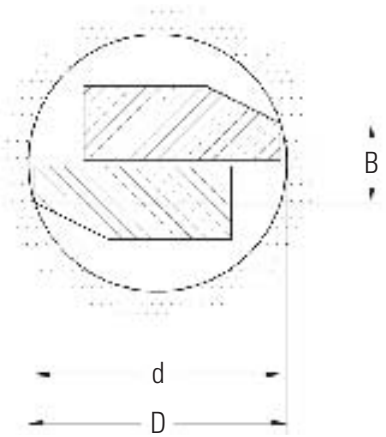


Figura 2.15 *Medición de pequeños diámetros.*

Es una buena práctica medir en ambas direcciones a-a y b-b en figura 2.14 A-3 para asegurar una correcta medición.

Medición de agujeros pequeños

La medición de pequeños diámetros interiores es limitada, por lo que estamos expuestos a confundir el valor aparente d con el valor real D (figura 2.15).
El mayor valor B en la figura 2.15 o el menor valor D es el error.

Medición de profundidad

Cuando realice una medición de la profundidad no permita que el extremo del instrumento se incline, manténgalo nivelado (figura 2.16).

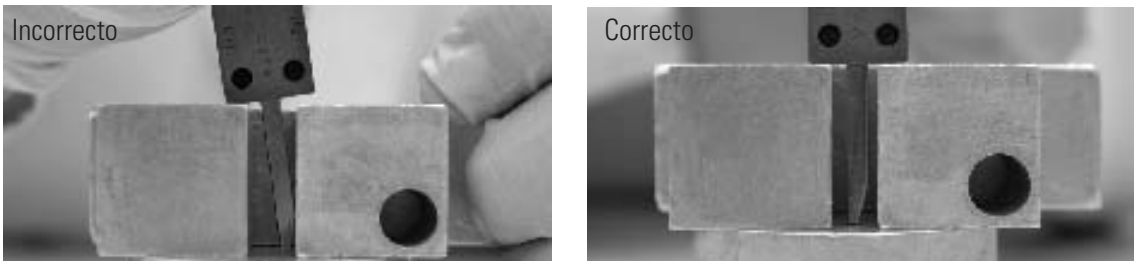


Figura 2.16 *Ejemplos de métodos de medición de profundidad incorrectos y correctos.*

La esquina del objeto es más o menos redonda, por tanto, gire el resaque de la barra de profundidad hacia la esquina (figura 2.17).

Figura 2.17 *Ejemplos de métodos de medición, incorrectos y correctos.*

Paso 3. Guardar adecuadamente el calibrador después de usarlo

Cuando se usa el calibrador, la superficie de la escala se toca a menudo con la mano; por tanto, después de usarlo limpie la herramienta frotándola con un trapo y aplique aceite a las superficies deslizantes de medición antes de colocar el instrumento en su estuche.

Tenga cuidado, no coloque ningún peso encima del calibrador pues podría torcerse la regleta (figura 2.18).

No golpee los extremos de las quijadas y picos ni los utilice como martillo (figura 2.19).

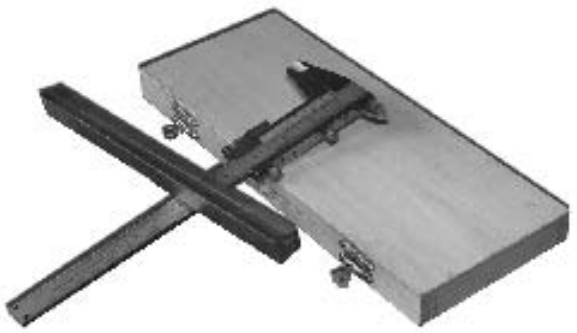


Figura 2.18 *No ponga objetos encima de la herramienta.*

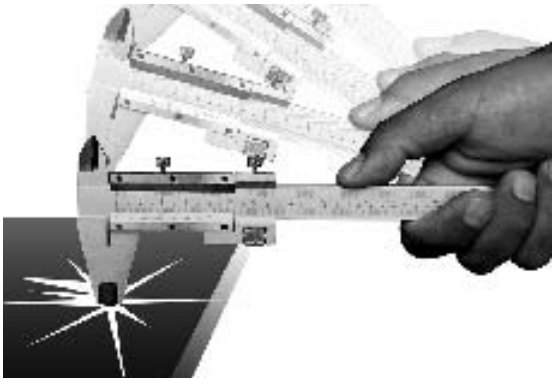


Figura 2.19 *No golpee los extremos de las quijadas.*

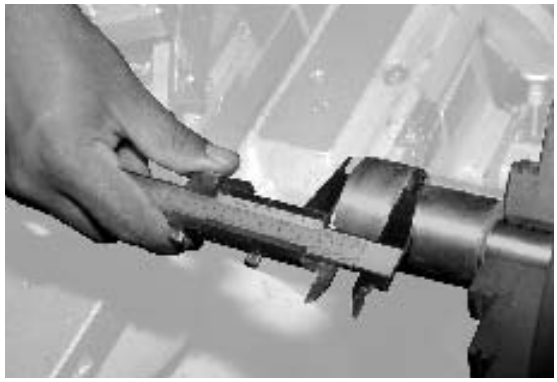


Figura 2.20 *No mida un objeto mientras esté en movimiento.*

No utilice el calibrador para medir algún objeto en movimiento (figura 2.20).

Cómo leer el calibrador (sistema métrico)

Ejemplo 1

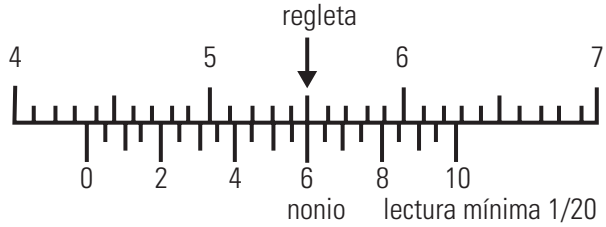


Figura 2.21 *Calibrador en sistema métrico.*

Paso 1

El punto cero de la escala del nonio está localizado entre 43 y 44 mm sobre la escala de la regleta. En este caso lea primero 43 mm.

Paso 2
Sobre la escala del nonio, localice la graduación que está en línea con la graduación de la escala de la regleta. Esta graduación es de *"6"*, este 6 sobre el nonio indica 0,6 mm.

Paso final
Paso 1 + Paso 2
43 + 0,6 = 43,6
La lectura correcta es 43,6 mm.

Ejemplo 2

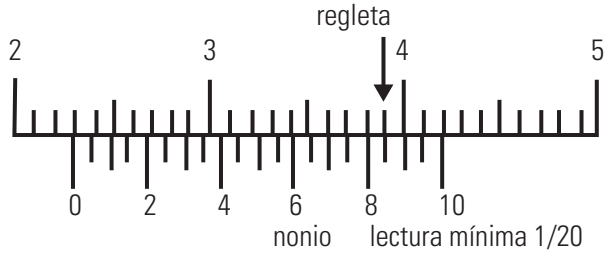


Figura 2.22 *Calibrador en sistema métrico.*

Paso 1 22
Paso 2 0,85
Lectura 22,85 mm

Ejemplo 3

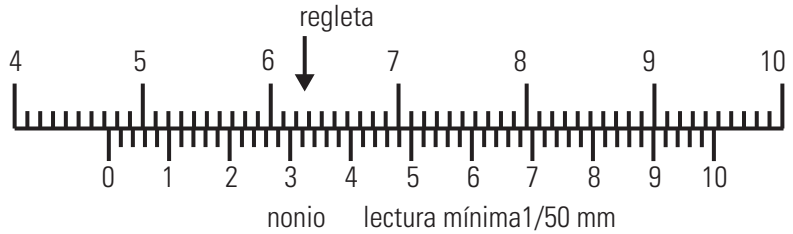


Figura 2.23 *Calibrador en sistema métrico.*

Paso 1 47
Paso 2 0,32
Lectura 47,32 mm

Ejemplo 4

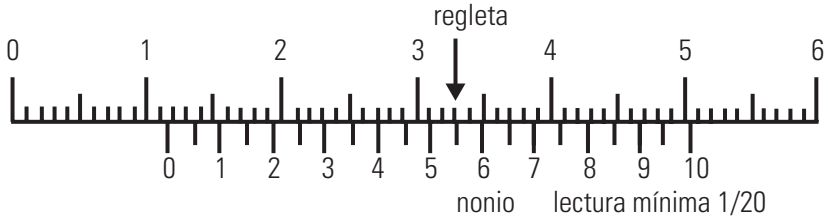


Figura 2.24 *Calibrador en sistema métrico.*

Paso 1 11
Paso 2 0,55
Lectura 11,55 mm

Cómo leer el calibrador (sistema inglés)

Ejemplo 1

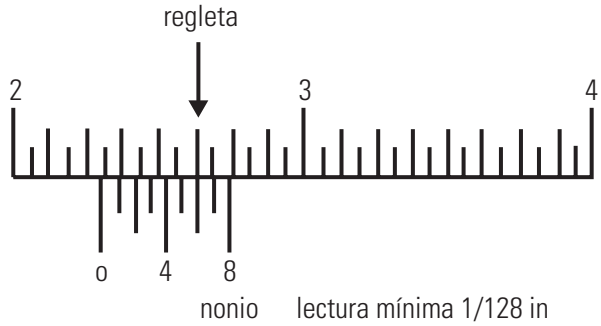


Figura 2.25 *Calibrador en sistema inglés.*

Paso 1
El punto cero de la escala del nonio está localizado entre $2\frac{4}{16}$, y $2\frac{5}{16}$ in, sobre la escala de la regleta.

En este caso, lea $2\frac{4}{16}$ in.

Paso 2
Sobre la escala del nonio, localice la graduación que está en línea con una graduación sobre la escala de la regleta.

Esta graduación es "6", este 6 sobre el nonio indica: $\frac{6}{128}$

Paso final
Paso 1 + Paso 2

$$2\frac{4}{16}+\frac{6}{128}=\frac{36}{16}+\frac{6}{128}=$$

$$=\frac{288+6}{128}$$

$$=\frac{294}{128}=\frac{147}{64}$$

$$=2\frac{19}{64}$$

La lectura correcta es $2\frac{19}{64}$ in.

Ejemplo 2

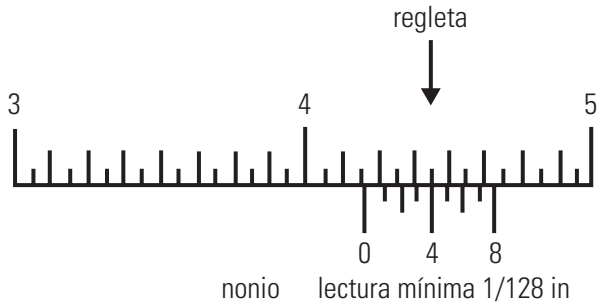


Figura 2.26 *Calibrador en sistema inglés.*

Paso 1 + Paso 2

$$4\frac{3}{16}+\frac{4}{128}=4\frac{24}{128}+\frac{4}{128}$$
$$=4\frac{28}{128}$$
$$=4\frac{7}{32}$$

La lectura correcta es $4\frac{7}{32}$ in.

Ejemplo 3

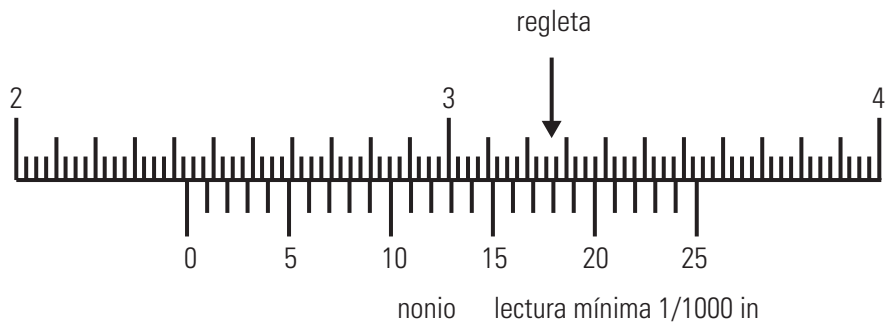


Figura 2.27 *Calibrador en sistema inglés.*

Paso 1

Leemos 2,400 in, primero

Paso 2

La graduación 18 sobre la escala del nonio está en línea con una graduación de la escala de la regleta, esta lectura es 18 in / 1 000 o 0.018 in.

Paso 1 + Paso 2

2,400 + 0,018 = 2,418

La lectura correcta es 2,418 in.

Ejemplo 4

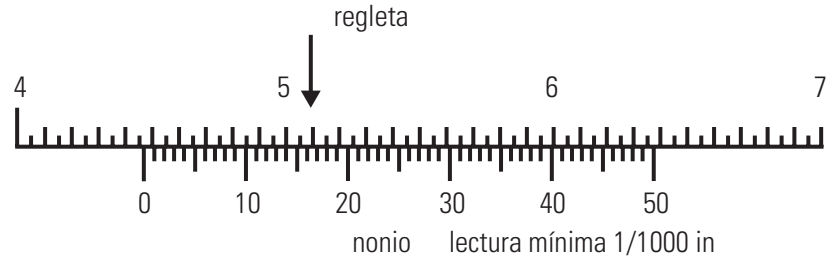


Figura 2.28 *Calibrador en sistema inglés.*

Paso 1 + Paso 2
4,450 + 0,016 = 4,466.
La lectura correcta es 4,466 in.

Micrómetros o palmer

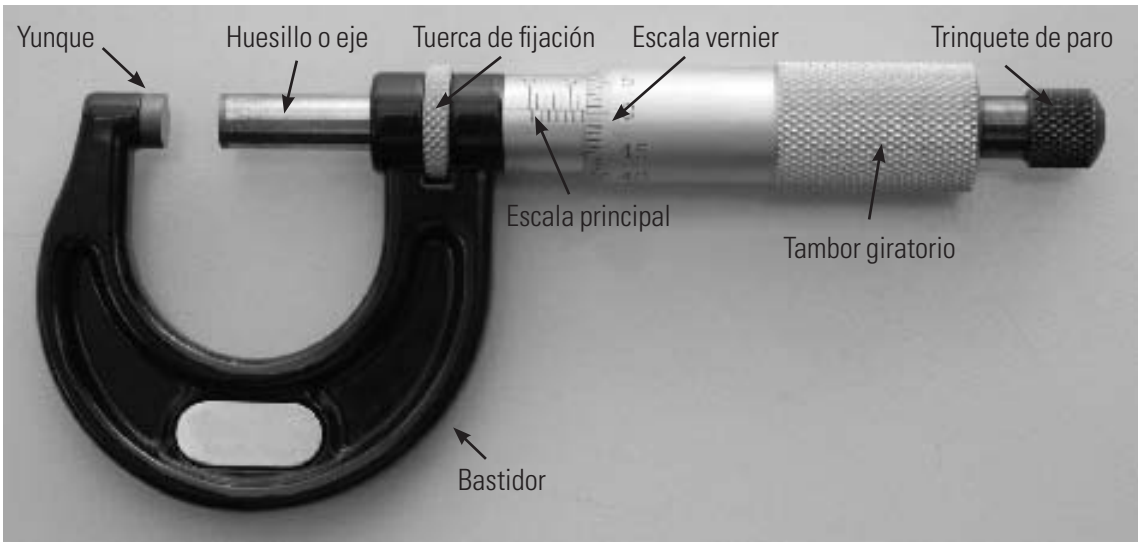


Figura 2.29 *Partes de un micrómetro.*

Son las herramientas para medidas de precisión que más se emplean en la industria. Su uso correcto es esencial para quien interviene en la fabricación o inspección de partes maquinadas. Los tipos comunes de instrumentos micrométricos o micrómetros son de exteriores, de interiores y de profundidades.

El micrómetro tiene un dispositivo que mide el desplazamiento del husillo cuando éste se mueve mediante el giro de un tornillo, lo que convierte el movimiento giratorio del tambor en movimiento lineal del husillo. Un pequeño desplazamiento lineal del husillo corresponde a un significativo desplazamiento angular del tambor. Cuando el husillo se desplaza una distancia igual al paso de los hilos del tornillo, las graduaciones sobre el tambor marcan una vuelta completa (figura 2.29).

Figura 2.30 *Partes del micrómetro.*

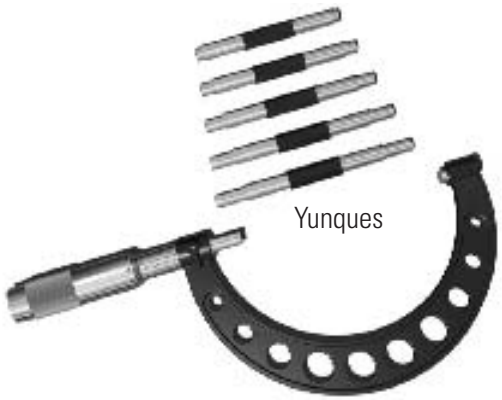


Figura 2.31 *Micrómetro de tipo yunque intercambiable.*

Figura 2.32 *Presión de medición.*

El rango de medición del micrómetro estándar está limitado a 25 mm (en el sistema métrico) o a 1 in (en el sistema inglés). Para un mayor rango de mediciones se necesitan micrómetros de diferentes rangos de medición.

Con un micrómetro equipado con un yunque intercambiable (figura 2.31) es posible medir un rango amplio de longitudes; este tipo de micrómetro cubre de cuatro a seis veces el rango de medición del micrómetro estándar, pero es ligeramente inferior en precisión al micrómetro estándar.

Los micrómetros están graduados en centésimas (0,01) de milímetros (sistema métrico) o milésimas (0,001) de in (sistema inglés).

Un micrómetro equipado con un nonio permite lecturas de 0,001 mm, o de 0,0001 in.

Para estabilizar la presión de medición que debe aplicarse al objeto a medirse, el micrómetro está equipado generalmente con un freno de trinquete. Sin embargo, si se usa durante un periodo largo, el freno del trinquete podría deteriorarse al aplicar una presión de medición determinada, ocasionando una medición inexacta; el mayor problema en este tipo de micrómetro es que la presión de medición puede cambiar con la velocidad de giro de la perilla del trinquete (figura 2.32).

Un micrómetro del tipo con freno de fricción, tiene en el interior del manguito un aditamento para una presión constante, experimenta menos cambios en la presión de medición con el uso individual y es más apropiado para mediciones precisas (figura 2.32).

El micrómetro usado durante un largo periodo o de manera inapropiada, podría experimentar alguna desviación del punto cero; para corregir esto, los micrómetros incluyen en su estuche un patrón y una llave (figura 2.33).

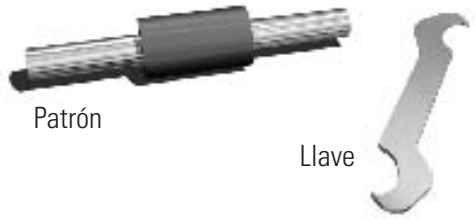


Figura 2.33 *Patrón y llave.*

Algunas veces, al usar el micrómetro, es conveniente utilizar una base, pues si el cuerpo del micrómetro se sostiene por un largo periodo continuo, el calor de la mano puede dilatarlo lo suficiente para causar una variación en la lectura (figura 2.34).

Figura 2.34 *Base para micrómetro.*

Tipos de micrómetros

Micrómetro para interiores

Este micrómetro utiliza un sistema de contacto de medición de tres puntos para determinar el tamaño de un agujero mandrilado o taladro. El instrumento es de lectura directa y tiene mejores probabilidades de dar una lectura confiable debido a su contacto de tres puntas, que hace que se centre el instrumento.

Algunos factores importantes que se deben tener en cuenta en el cuidado del micrómetro son: limpiarlo y aceitarlo después de usarlo; tener cuidado de no dejarlo caer, pues incluso una caída a una distancia corta puede desalinearlo; mantenerlo retirado de las rebabas de una máquina herramienta; colocarlo sobre un tablero de herramientas limpio o una toalla de taller limpia, cerca del lugar de trabajo; antes de usarlo limpiar las caras de medición; cuando se guarde debe comprobarse que las caras de las puntas no se toquen. Los micrómetros para interiores tienen las mismas graduaciones que los de exteriores, con ellos se aproxima a la milésima de in y tienen capacidad de medición que varía de 1,5 a 20 in o más.

El micrómetro para interiores tipo tubular consta de la cabeza del micrómetro con puntas fijas templadas desmontables y varias barritas tubulares para medición con puntas de contacto templadas. Las longitudes de estas barritas difieren en incrementos de 0,5 in para corresponder a la capacidad de la medición de la cabeza del micrómetro. El juego lleva un maneral para sostener el instrumento en lugares en los que resulta difícil sostenerlo directamente.

Micrómetros para aplicación especial

Se trata de los micrómetros para tubo. Este tipo de micrómetro está diseñado para medir el espesor de la pared de partes tubulares, como cilindros o collares. Existen tres tipos:

1. Tope fijo esférico
2. Tope fijo y del husillo esféricos
3. Tope fijo tipo cilíndrico

Micrómetro para ranuras

En este micrómetro ambos topes tienen un pequeño diámetro con el fin de medir pernos ranurados, cuñeros, ranuras, etc. El tamaño estándar de la porción de medición es de 3 mm de diámetro y 10 mm de longitud.

Micrómetro de puntas

Estos micrómetros tienen ambos topes en forma de punta. Se utilizan para medir el espesor del alma de brocas, el diámetro de raíz de roscas externas, ranuras pequeñas y otras porciones difíciles de alcanzar. El ángulo de los puntos puede ser de 15, 30, 45 o 60 grados. Las puntas de medición normalmente tienen un radio de curvatura de 0,3 mm, ya que ambas puntas pueden no tocarse; un bloque patrón se utiliza para ajustar el punto cero. Con el fin de proteger las puntas, la fuerza de medición en el trinquete es menor que la del micrómetro estándar de exteriores.

Micrómetro para ceja de latas

Este micrómetro está especialmente diseñado para medir los anchos y las alturas de cejas de latas.

Micrómetro indicativo

Este micrómetro cuenta con un indicador de carátula. El tope del arco puede moverse una pequeña distancia en dirección axial; su desplazamiento lo muestra el indicador. Este mecanismo permite aplicar una fuerza de medición uniforme a las piezas.

Micrómetro de exteriores con husillo no giratorio

En los micrómetros normales el husillo gira con el tambor cuando éste se desplaza en dirección axial; en este micrómetro, el husillo no gira cuando es desplazado. Debido a que el husillo no giratorio no produce torsión radial sobre las caras de medición, el desgaste de las mismas se reduce notablemente. Este micrómetro es adecuado para medir superficies con recubrimiento, piezas frágiles y características de partes que requieren una posición angular específica de la cara de medición del husillo.

Micrómetro con doble tambor

Una de las características del tipo no giratorio con doble tambor es que la superficie graduada del tambor está al ras con la superficie del cilindro en que están grabadas la línea índice y la escala vernier, lo cual permite lecturas libres de error de paralaje.

Micrómetro tipo discos para espesor de papel

Este tipo es similar al micrómetro tipo discos de diente de engrane, pero utiliza un husillo no giratorio para eliminar la torsión sobre la superficie de la pieza, lo que lo hace adecuado para medir papel o piezas delgadas.

Micrómetro de cuchillas

En este tipo, los topes son cuchillas por lo que pueden medirse ranuras angostas, cuñeros y otras porciones difíciles de alcanzar.

Micrómetros para espesor de láminas

Este tipo de micrómetros tiene un arco alargado capaz de medir espesores de láminas en porciones alejadas del borde de éstas. La profundidad del arco varía de 100 a 600 mm.

Micrómetro para dientes de engranaje

El engrane es uno de los elementos más importantes de una máquina, por lo que su medición con frecuencia es requerida para asegurar las características deseadas de una máquina. Para que los engranes ensamblados funcionen de forma correcta, sus dientes deben engranar adecuadamente entre sí sin cambiar la distancia entre los dos centros de rotación.

Micrómetros para dimensiones mayores a 25 mm

Para medir dimensiones exteriores mayores a 25 mm (1 in) se tienen dos opciones. La primera consiste en utilizar una serie de micrómetros para mediciones de 25 a 50 mm (de 1 a 2 in), 50 a 75 mm (2 a 3 in), etc. La segunda opción es utilizar un micrómetro con rango de medición de 25 mm y arco grande con tope de medición intercambiable.

Precauciones al medir y cómo usar el micrómetro del tipo de freno de fricción

Paso 1. Verificar la limpieza del micrómetro

El mantenimiento adecuado del micrómetro es esencial. Antes de guardarlo, limpie las superficies del husillo, yunque y otras partes, removiendo el sudor, polvo y manchas de aceite; después, aplique aceite anticorrosivo.

No olvide limpiar perfectamente las caras de medición del husillo y el yunque, de lo contrario no obtendrá mediciones exactas. Para efectuar las mediciones correctamente es esencial que el objeto a medir se limpie perfectamente del aceite y polvo acumulados (figura 2.35).

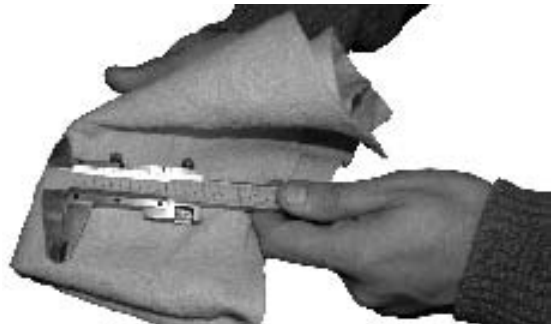


Figura 2.35 *Limpie con un trapo.*

Paso 2. Utilizar el micrómetro adecuadamente

Para el manejo adecuado del micrómetro, sostenga la mitad del cuerpo en la mano izquierda, y el manguito o trinquete en la mano derecha, mantenga la mano fuera del borde del yunque (figura 2.36).

Algunos cuerpos de los micrómetros están provistos con aisladores de calor. Si se usa un cuerpo de éstos, sosténgalo por la parte aislada, así el calor de la mano no afectará al instrumento.

El trinquete es para asegurar que se aplica una presión de medición apropiada al obje-

Figura 2.36 *Método correcto para sujetar el micrómetro con las manos.*

Figura 2.37 *Método correcto para sostener el micrómetro con las manos.*

to que se está midiendo mientras se toma la lectura.

Inmediatamente antes de que el husillo entre en contacto con el objeto, gire el trinquete suavemente, con los dedos; cuando el husillo haya tocado el objeto dé tres o cuatro vueltas ligeras al trinquete a una velocidad uniforme (el husillo puede dar 1,5 o 2 vueltas libres). Hecho esto, se ha aplicado una presión adecuada al objeto que se está midiendo.

Si acerca la superficie del objeto directamente girando el manguito, el husillo podría aplicar una presión excesiva de medición al objeto y la medición será errónea (figura 2.38).

Cuando la medición esté completa, despegue el husillo de la superficie del objeto girando el trinquete en dirección opuesta.

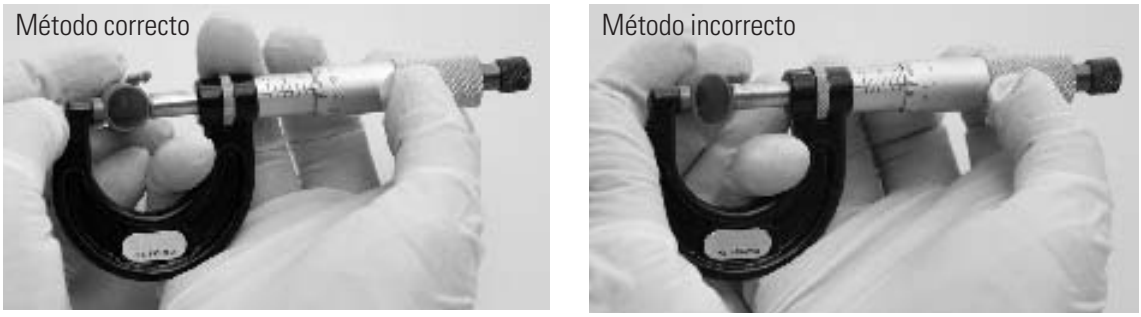


Figura 2.38 *Métodos correcto e incorrecto de medición.*

Paso 3. Verificar que el cero esté alineado

Como ya se comentó, cuando el micrómetro se usa constantemente o de una manera inadecuada, el punto cero del micrómetro puede desalinearse. Si el instrumento sufre una caída o algún golpe fuerte, algunas veces el paralelismo y la lisura del husillo y el yunque se desajustan y el movimiento del husillo es anormal (figura 2.39).

Figura 2.39 *Paralelismo de las superficies de medición.*

a) El husillo debe moverse libremente (figura 2.40a).
b) El paralelismo y la lisura de las superficies de medición en el yunque deben ser correctas.
c) El punto cero debe estar en posición (si está desalineado siga las instrucciones para corregirlo) (figura 2.40b).

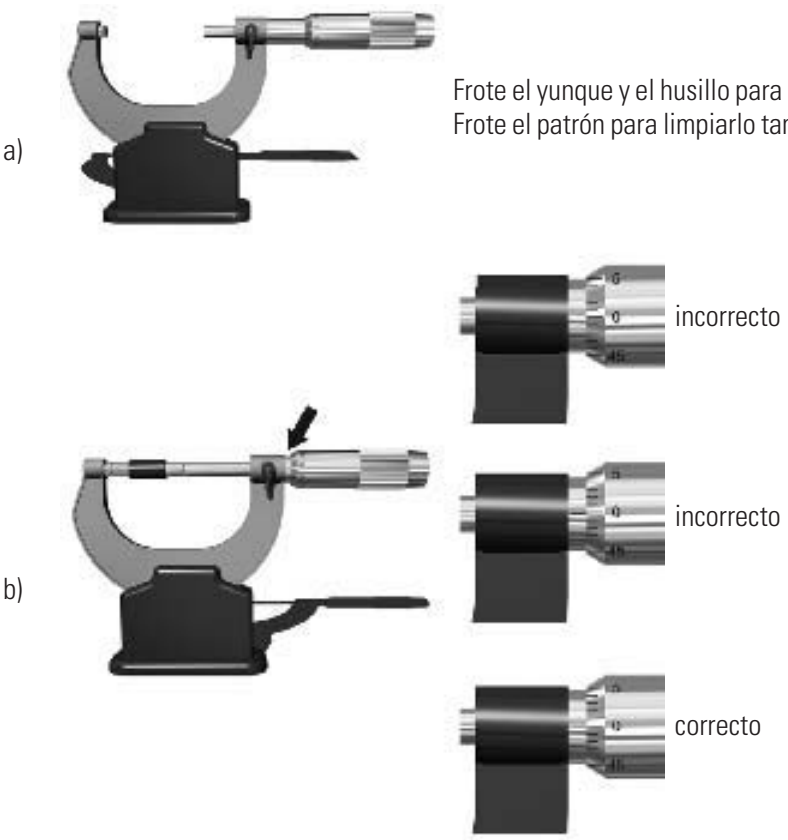


Figura 2.40 *a) yunque y patrón limpios. b) posición del punto cero incorrecto y correcto.*

Paso 4. Asegurar el contacto correcto entre el micrómetro y el objeto

Es esencial poner el micrómetro en contacto correcto con el objeto a medir. Use el micrómetro en ángulo recto (90°) con las superficies a medir (figura 2.41).

Figura 2.41 *Contacto correcto con el objeto a medir.*

Cuando se mide un objeto cilíndrico, es recomendable tomar la medición dos veces; al medirlo por segunda vez, gire el objeto 90°.

Figura 2.42 *No levante un objeto con el micrómetro.*

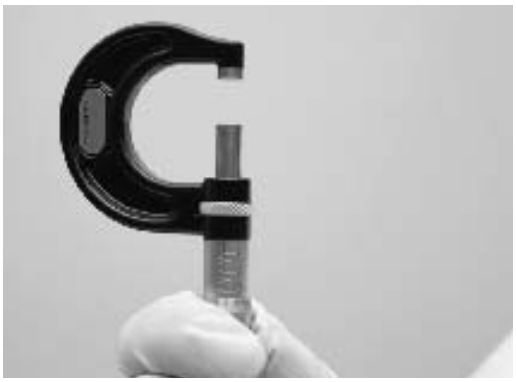


Figura 2.43 *No gire el manguito hasta el límite de su rotación.*

Figura 2.44 *Método I. Técnica para corregir el punto cero.*

Figura 2.45 *Gire el manguito en sentido contrario a las manecillas del reloj.*

No levante el micrómetro con el objeto sostenido entre el husillo y el yunque (figura 2.42).

No gire el manguito hasta el límite de su rotación, tampoco gire el cuerpo mientras sostiene el manguito (figura 2.43).

Cómo corregir el punto cero

Método I

Cuando la graduación cero está desalineada (figura 2.44).

a) Fije el husillo con el seguro (deje el husillo separado del yunque).
b) Inserte la llave con que viene equipado el micrómetro en el agujero de la escala graduada.
c) Gire la escala graduada para prolongarla y corregir la desviación de la graduación.
d) Verifique la posición cero otra vez, para comprobar que esté en su posición.

Método II

Cuando la graduación cero está desalineada dos graduaciones o más.

a) Fije el husillo con el seguro (deje el husillo separado del yunque).
b) Inserte la llave con que viene equipado el micrómetro en el agujero del trinquete, sostenga el manguito, gírelo del trinquete, sostenga el manguito, gírelo en sentido contrario a las manecillas del reloj (figura 2.45).
c) Empuje el manguito hacia afuera (es decir, hacia el trinquete) y se moverá libremente, relocalice el manguito a la longitud necesaria para corregir el punto cero.
d) Atornille toda la rosca del trinquete y apriételo con la llave (figura 2.46).
e) Verifique el punto cero otra vez y si la graduación cero está desalineada, corríjala de acuerdo con el método I.

Cómo leer el micrómetro (sistema métrico)

Conocimientos requeridos para la lectura

La línea de revolución sobre la escala está graduada en milímetros; cada pequeña marca de bajo de la línea de revolución indica el intermedio 0,5 mm entre cada graduación sobre la línea (figura 2.47).

El micrómetro mostrado es para el rango de medición de 25 a 50 mm y su grado más bajo de graduación representa 25 mm (figura 2.48).

Un micrómetro con rango de medición de 0 a 25 mm tiene como graduación más baja el 0.

Una vuelta del manguito representa un movimiento de exactamente 0,5 mm a lo largo de la escala, la periferia del extremo cónico del manguito está graduada en cincuentavos (1/50); con un movimiento del manguito a lo largo de la escala una graduación equivale a 0,01 mm (figura 2.48).

Figura 2.46 *Atornille toda la rosca del trinquete y apriétela con la llave.*

Figura 2.47 *Micrómetro graduado en milímetros.*

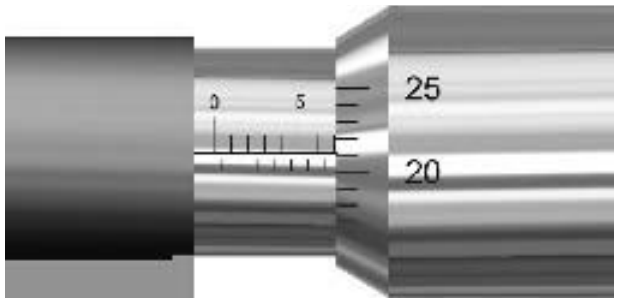


Figura 2.48 *Micrómetro con rango de medición de 25 a 30 mm.*

Ejemplos de lecturas

Ejemplo 1

Paso 1

Lea la escala (I) sobre la línea de revolución en la escala 56 mm (figura 2.49).

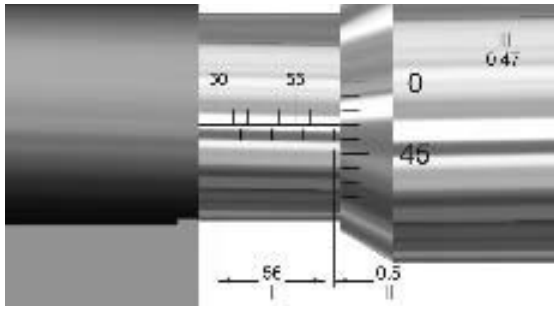


Figura 2.49 *Ejemplo 1.*

Paso 2
Vea si el extremo del manguito está sobre la marca 0,5 mm; si es así agregue 0,5 mm (figura 2.50A).

Si está debajo de 0,5 mm no agregue nada (figura 2.50b), para nuestro ejemplo en este caso.

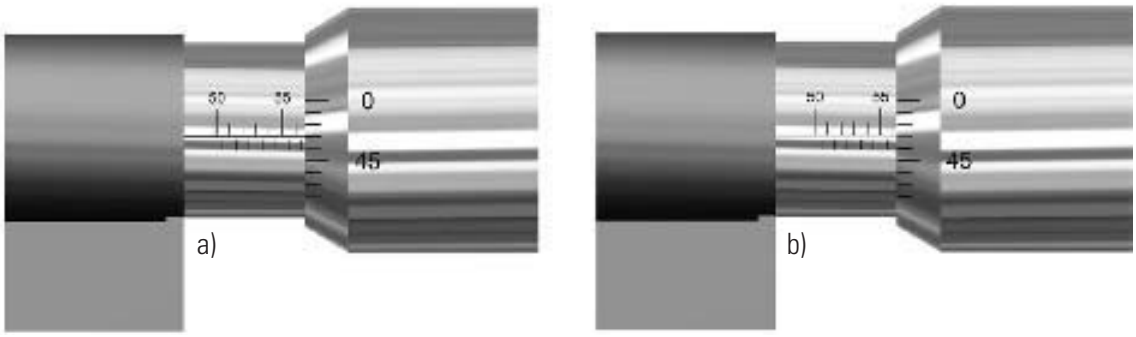


Figura 2.50 *Ejemplo 1.*

Paso 3
Tome la lectura de la escala sobre el manguito, la cual coincide con la línea de revolución de la escala 0,47 mm.

Paso final
La suma de las lecturas en los pasos 1, 2, 3, es la lectura correcta.

Ejemplo 2

Lea las escalas anteriormente mostradas (figura 2.47).

Paso 1. 37
Paso 2. 0,5
Paso 3. 0,11
Paso 4. 0,008 (visualmente)
37,618 mm

Ejemplo 3

Lea las escalas (figura 2.48).

Paso 1. 7
Paso 2. 0,0
Paso 3. 0,21
7,21 mm

Ejemplo 4

El caso mostrado es para un micrómetro con un nonio (figura 2.51).

La lectura es la siguiente:

Paso 1. 8
Paso 2. 0,5
Paso 3. 0,29
Paso 4. 0,003
8,793 mm

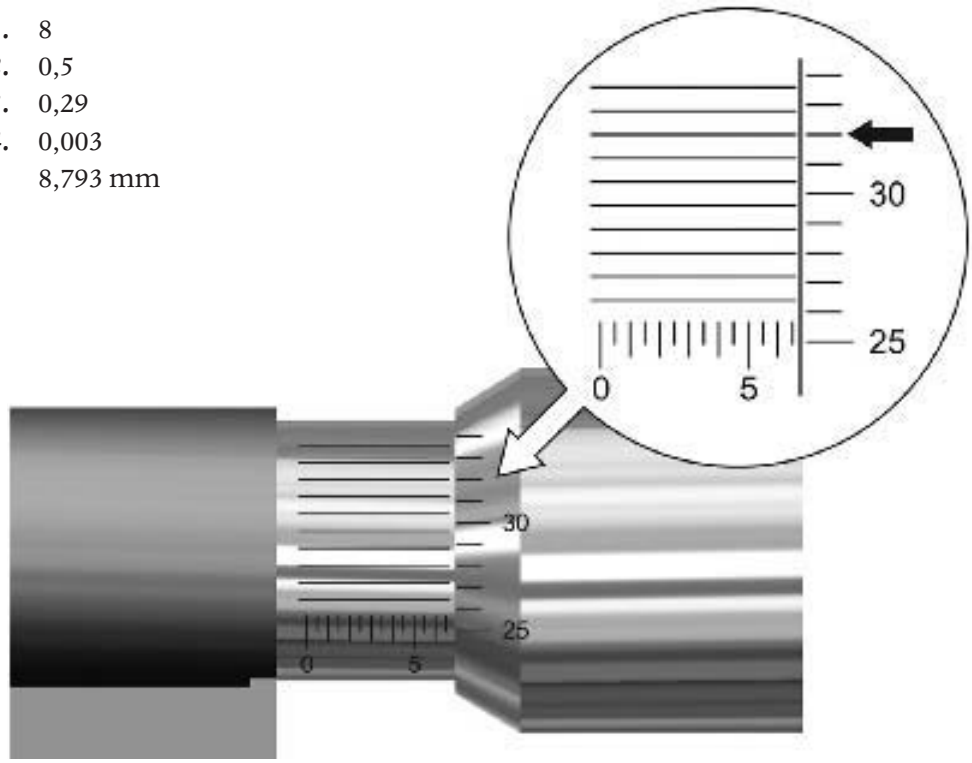


Figura 2.51 *Ejemplo 4.*

Ejemplo 5

En un micrómetro tipo europeo, la escala del manguito está graduada en centésimas (1/100) para permitir la lectura directa 0,01 mm (figura 2.52).

La lectura correcta es 5,93 mm.

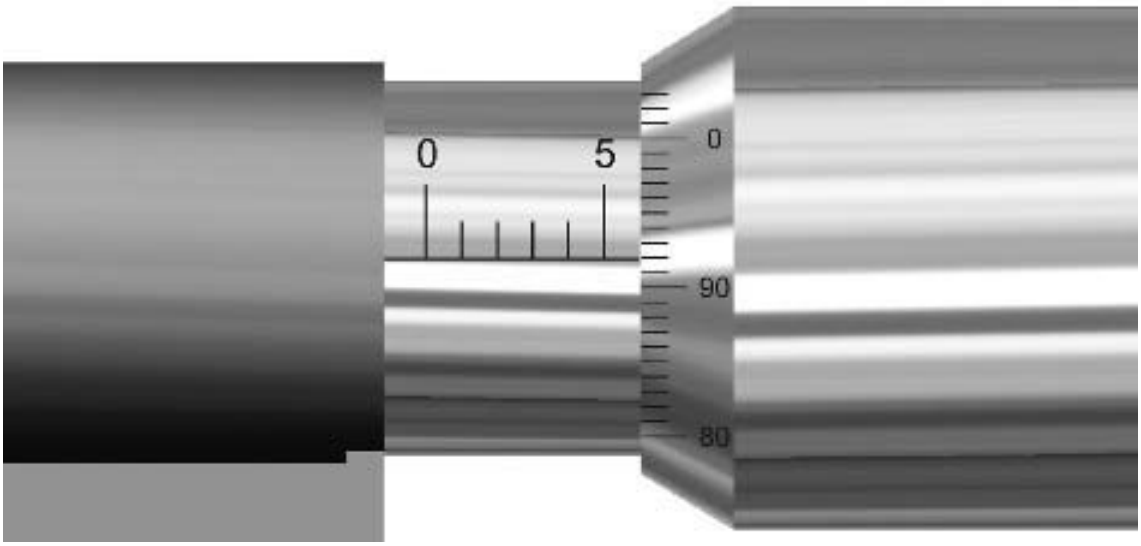


Figura 2.52 *Ejemplo 5.*

Cómo leer el micrómetro (sistema inglés)

El que se muestra a continuación es un micrómetro para medidas ubicadas en el rango de 2 a 3 in.

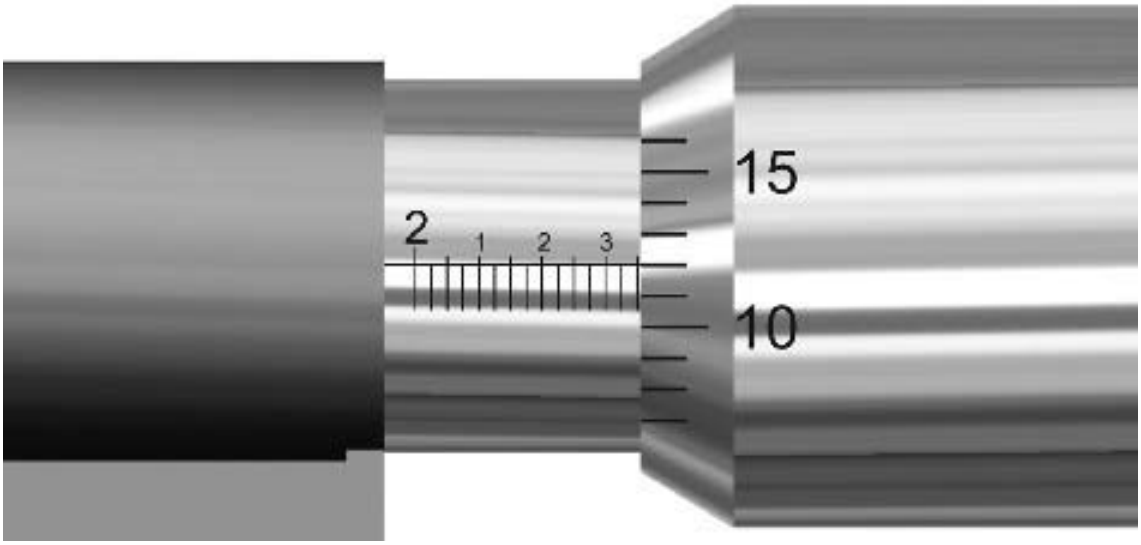


Figura 2.53 *Sistema inglés.*

La línea de revolución sobre la escala está graduada en 0,025 in.

En consecuencia, los dígitos 1, 2 y 3 sobre la línea de revolución representan 0,100; 0,200 y 0,300 in respectivamente.

Una vuelta del manguito representa un movimiento exactamente de 0,25 in a lo largo de la escala, el extremo cónico del manguito está graduado en veinticincoavos (1/25); por tanto, una graduación del movimiento del manguito a lo largo de la escala graduada equivale a 0,001 in .

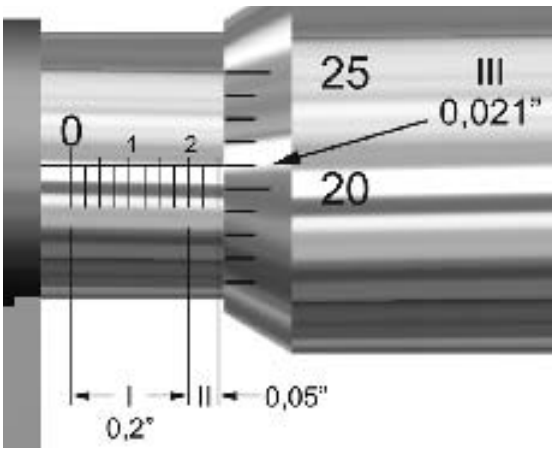


Figura 2.54 *Ejemplo 1.*

Ejemplo 1

Paso 1 y 2

Lea la línea de revolución de la escala 0,2 + 0,05 in.

Paso 3

Lea la graduación sobre el manguito que coincida con la línea de revolución de la escala 0,021.

Paso final

La lectura correcta es el total de las lecturas en los pasos 1, 2 y 3.

0,2 + 0,05 + 0,021 = 0,271.

0,271 in

Ejemplo 2

Leamos el micrómetro

Paso 1. 2,3
Paso 2. 0,05
Paso 3. 0,011
Paso 4. 0,0009 (visualmente)
2,3619 in

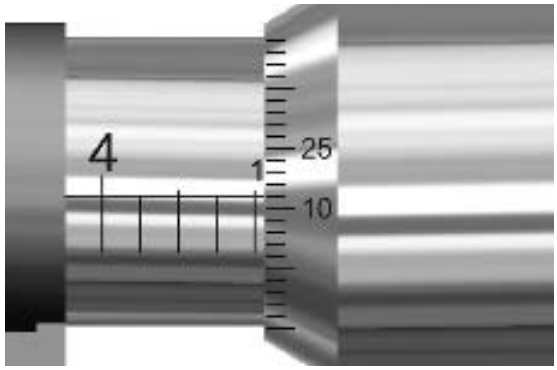


Figura 2.55 *Ejemplo 3.*

Ejemplo 3

Paso 1. 4,1
Paso 2. 0,0
Paso 3. 0,011
4,111 in

Ejemplo 4

En un micrómetro provisto con un nonio, la lectura correcta es la siguiente:

Paso 1 0,100
Paso 2. 0,025
Paso 3. 0,018
Paso 4. 0,0004 (con ayuda del nonio)
0,1434 in

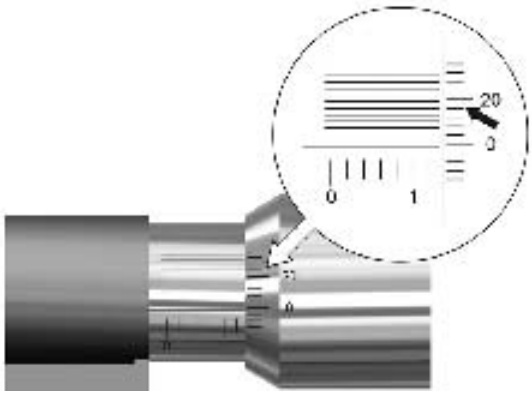


Figura 2.56 *Ejemplo 4.*

Esferómetro

Este instrumento utiliza un tornillo micrométrico y se emplea para medir espesores de láminas y chapas y principalmente para medir radios esféricos. Fue creado por el óptico Cauchoix para medir la curvatura que debían tener las lentes. Consta de un trípode (figura 2.57) cuyas patas se encuentran a la misma distancia unas de otras formando entre sí los vértices de un triángulo equilátero y en cuyo centro se halla un orificio roscado de paso de 1 mm en el cual se introduce un tornillo que tiene solidario un disco metálico con 100 divisiones. En el trípode se encuentra montada de manera fija una regla milimetrada en forma vertical que hace contacto tangencial con el disco, con cero en el centro de una escala doble.

Si las tres patas fijas y la móvil (central del tornillo) se encuentran en el mismo plano, el cero de la regla y del disco coinciden. Cuando el tornillo da una vuelta completa, el disco se desplaza una división de 1 mm de la regla, siendo la apreciación del aparato de:

$$A = \frac{\text{Menor división de la regla}}{\text{Número de divisiones del disco}} = \frac{1\text{mm}}{100} = 0,01\text{mm}$$

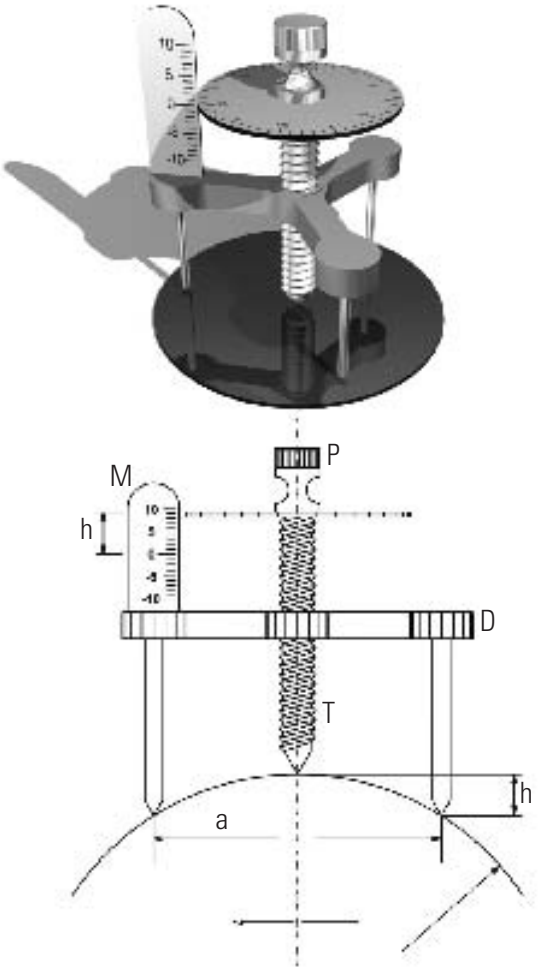


Figura 2.57 *Esferómetro.*

Ejemplos de uso

Medición del espesor de una pieza

Se verifica el cero del aparato colocando el esferómetro sobre una superficie perfectamente plana (mármol) hasta que las puntas estén en el mismo plano, coincidiendo, por tanto, los ceros de la regla y del disco. Se desenrosca el tornillo, se coloca la pieza cuyo espesor se desea medir sobre el mármol debajo del tornillo y se vuelve a enroscar éste hasta que la punta haga contacto con la pieza. Una vez logrado ello se leen los milímetros en la regla y, en el disco, la división que coincide con la regla da los centésimos de milímetro.

Medición del radio de una esfera

Se conoce la distancia "a" entre las patas del trípode que es igual entre las tres y la distancia *d* de éstas al tornillo central. Primero se coloca el instrumento en cero igual que se hizo para medir espesores, corrigiendo según haya diferencia en más o en menos. Se apoya el esferómetro sobre la esfera cuidando que las tres patas del trípode hagan contacto, desenroscando previamente el tornillo (figura 2.58), hasta que permita apoyar el trípode. Luego se procede a enroscarlo para que haga contacto con la esfera. Se lee en la regla y disco la medida *h* y se aplica la fórmula:

$$R = \frac{a^2 + 4h^2}{8h} \qquad (2.1)$$

o también, aplicando la propiedad distributiva se tendrá:

$$R = \frac{a^2}{8h} + \frac{h}{2} \qquad (2.2)$$

Existen esferómetros de mayor precisión con paso del tornillo de ½ mm y disco graduado dividido en 500 partes; para este aparato la apreciación es de:

$$A = \frac{\text{Menor división de la regla}}{\text{Número de divisiones del disco}} = \frac{0{,}5\text{mm}}{500} = 0{,}001\text{mm}$$

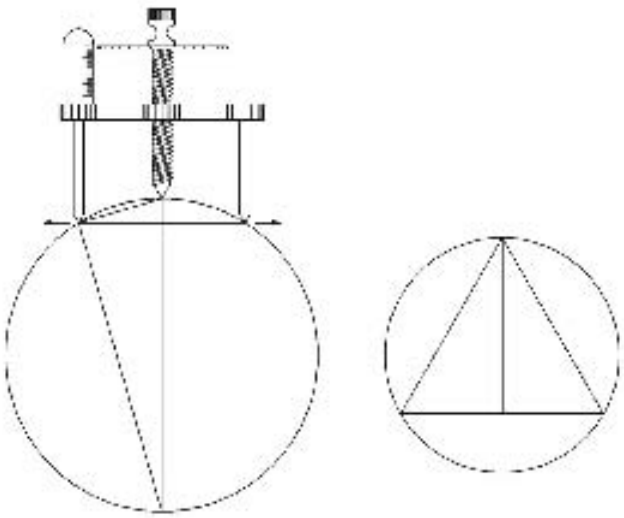


Figura 2.58 *Medición del radio de una esfera.*

$$\frac{2R-h}{\frac{a}{2}}=\frac{\frac{a}{2}}{h}\Rightarrow R=\frac{a^2+4h^2}{8h} \qquad A \quad h \quad 2R-h\frac{a}{2}\left(a\right) \quad a\frac{a}{2} \quad A-A\left(b\right)>$$

Calibrador de altura o medidor de altura

Es un dispositivo para medir la altura de piezas o las diferencias de altura entre planos a diferentes niveles.

Este aparato también se utiliza como herramienta de trazo, para lo cual incluye un buril. El medidor de altura, creado por medio de la combinación de una escala principal con un vernier para realizar mediciones rápidas y exactas, cuenta con un solo palpador y la superficie sobre la cual descansa actúa como plano de referencia para realizar las mediciones (figura 2.59).

El calibrador de altura tiene una exactitud de 0,001 in, o su equivalente en cm se lee de la misma manera que los calibradores de vernier y está equipado con escalas vernier de 25 o 50 divisiones y con una punta de buril que puede hacer marcas sobre metal.

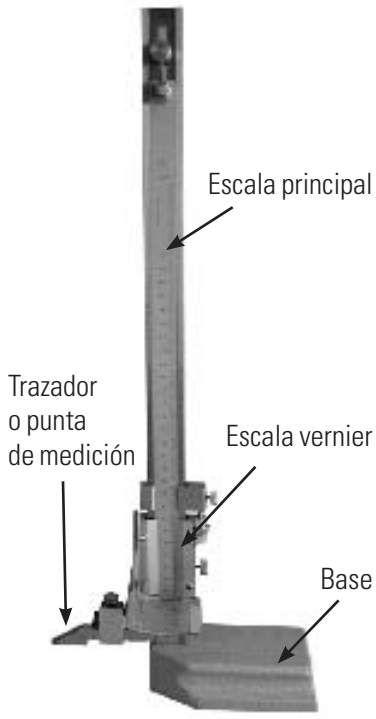


Figura 2.59 *Calibrador de altura.*

Precauciones al usar el medidor de altura

1. Seleccione el medidor de altura que mejor se ajuste a su aplicación.

2. Asegúrese de que el tipo, rango de medición, graduación u otras especificaciones son apropiadas para la aplicación deseada.
3. No aplique fuerza excesiva al medidor de altura.
4. Tenga cuidado de no dañar la punta del buril para trazar.
5. Elimine cualquier suciedad o polvo antes de usar su medidor.
6. Verifique el movimiento del cursor. No debe sentirse suelto o tener juego.
7. Corrija cualquier problema que encuentre, ajustando el tornillo de presión y el de fijación.

El medidor incorpora el mecanismo de amplificación del indicador de carátula. Las lecturas se toman sumando las lecturas de la graduación de la escala principal y la de la carátula, la cual indica la fracción de la escala principal con una aguja, lo que minimiza errores de paralaje y permite mediciones rápidas y exactas (figura 2.60).

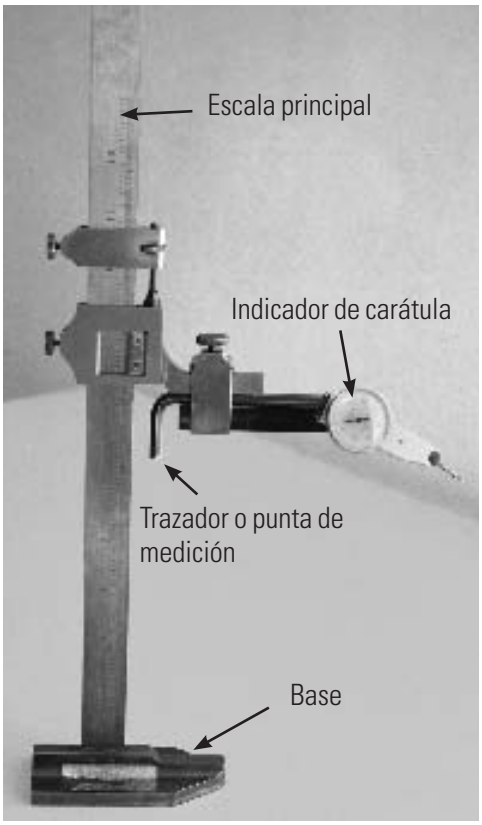


Figura 2.60 *Medidor de altura con indicador de carátula.*

Medidor de altura con carátula y contador

El mecanismo es el mismo que el medidor de altura con carátula. El mecanismo de amplificación del indicador consta del piñón, engrane amplificador y piñón central. El contador indica lecturas de 1 mm y las fracciones las registra la carátula. Debido a que hay lecturas en dos direcciones, podrían ser confusas cuando el cursor se mueva hacia arriba o hacia abajo cerca del punto 0.

Medidor de altura electrodigital

Hay dos tipos, uno utiliza un codificador rotatorio para detectar el desplazamiento y tiene doble columna. El otro emplea el detector de desplazamiento tipo capacitancia y cuenta con una sola columna de sección rectangular.

El mecanismo de detección de desplazamiento es un codificador rotatorio que convierte el desplazamiento lineal del cursor en un movimiento rotatorio de disco ranurado. El sistema de este medidor está basado en una escala de circuitos integrados de gran precisión.

Calibres de tolerancia

Existen comparadores fijos llamados calibres de tolerancias o fijos, también denominados diferenciales, para el control de piezas que se fabrican en serie y que deben guardar una cierta medida dentro de las tolerancias permitidas. Estas piezas son construidas para ensamblar con

otras o para reemplazar a las que se hallan gastadas, por ello deben ser intercambiables en un 100%. Estos calibres son del tipo de "pasa" y "no pasa", es decir, permiten pasar o no pasar, piezas que tienen una cierta medida, dentro de las tolerancias permitidas.

Tipos de calibres

Algunos de estos calibres son los que a continuación se detallan:

Calibres para pernos o ejes

El eje debe pasar en una de las mandíbulas y no pasar en la otra (figura 2.61a).

Calibres para agujeros cilíndricos

El calibre debe poder penetrar con uno de sus pernos calibrados en el agujero, y el otro no debe poder penetrar el mismo (figura 2.61b).

Calibres para espesores de superficies planas

Para controlar superficies planas de igual forma que en los casos anteriores (figura 2.62a).

Calibres para interiores de superficies planas

Controlan el interior o espacio entre dos superficies planas (figura 2.62b).

Calibres para agujeros cónicos y troncos cónicos

Controlan interiores o agujeros cónicos (figura 2.63a) o troncos cónicos (figura 2.63b).

Calibres para roscas

Son similares a los calibres para ejes y para agujeros cilíndricos, pero vienen con roscas pasa y no pasa, para cada tipo de rosca y para roscas interiores (figura 2.64a) y roscas exteriores (figura 2.64b).

Estos calibres son construidos de material indeformable y con resistencia al desgaste, como son los aceros especiales, con sus partes expuestas al rozamiento con las piezas

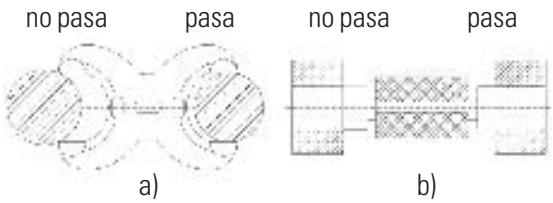


Figura 2.61 *Calibres para pernos o ejes.*

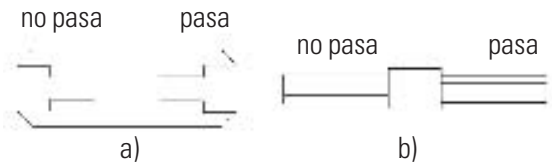


Figura 2.62 *Calibres para espesores de superficies planas.*

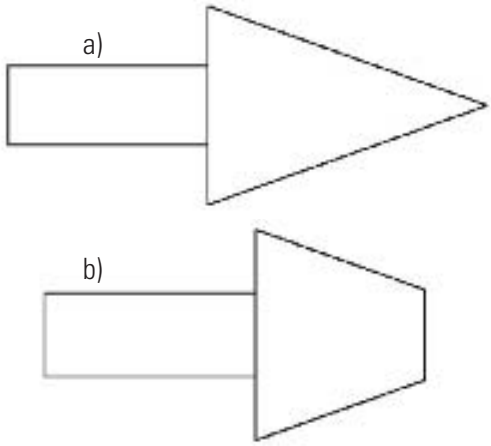


Figura 2.63 *Calibres para agujeros cónicos y troncos cónicos.*

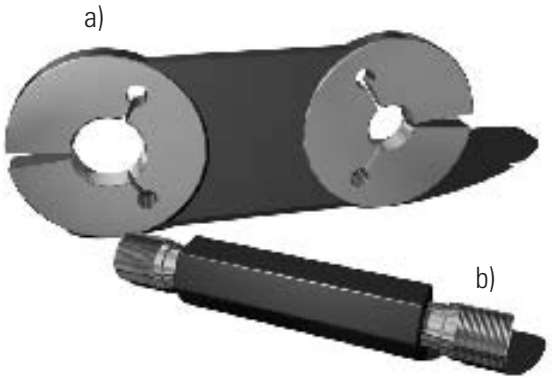


Figura 2.64 *Calibres para roscas.*

a medir, cementadas para evitar su pronto desgaste. Tienen gran rigidez y las zonas de contacto son trabajadas y pulidas con gran precisión.

Calibres para radios

Son calibres para verificar perfiles. Son de acero laminado duro, inoxidable y satinado contra óxidos. Están construidos de diferentes radios, tanto para superficies circulares internas (figura 2.65a) como externas (figura 2.65b).

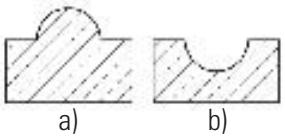


Figura 2.65 *Calibres para radios.*

Sondas o calibres de espesores (lainas)

Consisten en delgadas hojas de acero (figura 2.66) que varían de espesor y sirven para medir ranuras estrechas, entalladuras o espacios entre superficies que no están en contacto pero sí muy cercanas. Están construidas generalmente de espesores de 5 a 50 centésimas de milímetros, o en in desde 0,002 a 0,025 in. Forman un paquete que se despliega según la sonda que se desea utilizar. Cada hoja trae impreso el espesor que posee.

Figura 2.66 *Calibres de espesores.*

Peines o calibres para roscas

Consiste en un juego de plantillas (figura 2.67), denominadas también cuenta hilos, que tienen la forma de las distintas roscas, tanto para interiores como para exteriores. Se construyen para roscas métricas (Internacional 60°), Whithworth (55°) y S.A.E. En cada plantilla está impreso el valor del paso que corresponde.

Figura 2.67 *Calibres para roscas.*

Comparador de carátula

Instrumento de medición en el que un pequeño movimiento del husillo se amplifica mediante un tren de engranes que mueven en forma angular una aguja indicadora sobre la carátula del dispositivo. La aguja indicadora puede dar tantas vueltas como lo permita el mecanismo de medición del aparato. Este indicador se monta en un soporte diseñado para mediciones específicas como espesores, profundidades, exteriores y variaciones. El comparador no es un instrumento independiente, para hacer mediciones se requiere de un plano de referencia y de un aditamento sujetador del comparador. Existen en el mercado una gran variedad de soportes y accesorios para diferentes comparaciones.

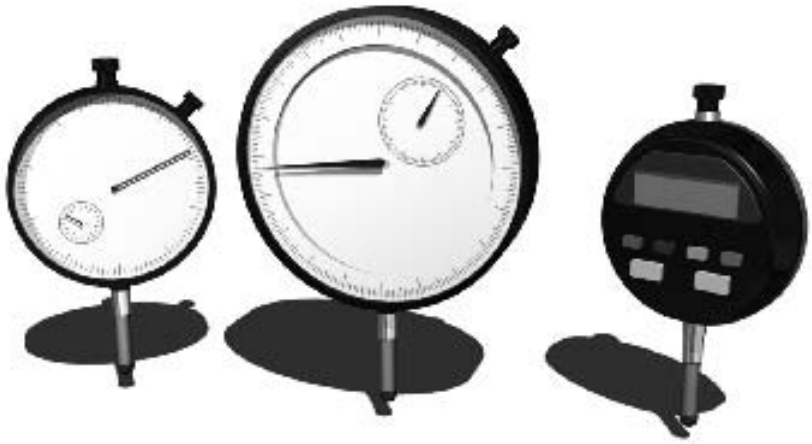


Figura 2.68 *Comparadores de carátula.*

Falsas escuadras

Las medidas angulares se efectúan utilizando falsas escuadras (universal) formadas por barras de acero inoxidable con formas que las hacen adecuadas para colocarlas en posición conveniente y así poder medir o controlar ángulos y además transportar medidas a una pieza cualquiera. Existen distintos tipos, algunos son los indicados en las figuras 2.69 y 2.70.

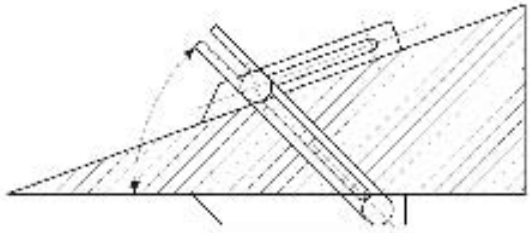


Figura 2.69 *Esquema de uso de la escuadra.*

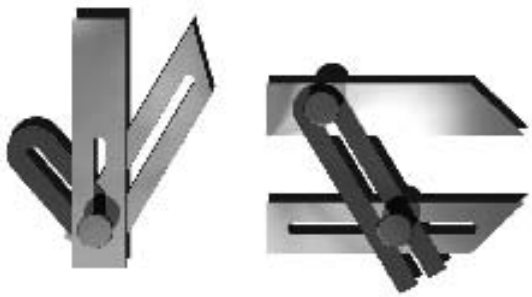


Figura 2.70 *Escuadras.*

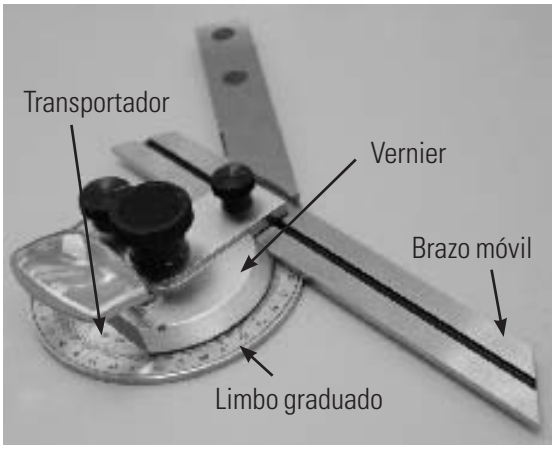


Figura 2.71 *Goniómetro*

Goniómetros

Funcionan como una falsa escuadra pero poseen un "transportador" en el cual se puede leer directamente el ángulo. Uno de los más sencillos está constituido por un semicírculo graduado (transportador) y un brazo móvil que tiene un índice señalador de ángulo (figura 2.71). El brazo móvil puede girar al tener como eje el centro del semicírculo. Están construidos de acero inoxidable. El goniómetro universal está formado por dos reglas (figura 2.71), una de ellas provista de un limbo graduado y la otra de un vernier circular y de un anillo dentro del cual puede girar el limbo o disco graduado de la primera regla. Poseen un tornillo de fijación que permite inmovilizar las reglas en una posición determinada. Están construidos en acero inoxidable, y la regla que posee el vernier tiene una longitud de 200 mm a 300 mm, generalmente. El limbo está graduado en ambas direcciones y pueden medirse ángulos según convenga a la derecha o izquierda. El limbo está graduado en 360° con lecturas de 0° a 90°, 90° a 0°, 0° a 90° y de 90° a 0°. El vernier tiene 12 divisiones que abarcan 23 grados del limbo, siendo, por tanto, la apreciación:

$$A = \frac{\text{Menor división del limbo}}{\text{Número de divisiones del vernier}} = \frac{1°}{12} = \frac{60'}{12} = 5'$$

Por lo que cada división del vernier representa 5 minutos. El vernier tiene generalmente 12 divisiones a la izquierda y 12 divisiones a la derecha.

Escuadras

Son elementos de trazado y comprobación de ángulos; existen distintos tipos según su aplicación:

- escuadra de 90°: se utiliza para comprobar piezas de formas paralelepípedas (figura 2.72a).
- escuadra a 120°: sirve para controlar piezas hexagonales (figura 2.72b).
- escuadra sombrero: es una escuadra a 90° con una regla del mismo espesor en forma perpendicular a la rama corta (figura 2.72c);
- escuadra en "T": es una escuadra con dos ángulos de 90° a cada lado de una de las reglas (figura 2.72d);
- escuadra "L": es una escuadra a 90° (figura 2.72e);
- escuadra "L" con regla corrediza: también es una escuadra a 90° que permite desplazarse uno de los lados que forman el ángulo (figura 2.72f).

Transportador universal

Es un instrumento compuesto (figura 2.73) de gran precisión y adaptabilidad, que sirve para marcar, transportar y obtener ángulos, centros de piezas cilíndricas y alturas o profundidades. Consta de una regla milimetrada en la cual puede insertarse un disco con un limbo graduado en grados que tiene incorporado un vernier, formando un goniómetro que permite, en conjunto con la regla, efectuar las mediciones de ángulos; posee además una escuadra angular para detener con la regla los centros de piezas cilíndricas; por último, cuenta con otra escuadra angular que ayuda a obtener con la regla ángulos de 45 y 90°. Esta última y el círculo cuentan con niveles para la nivelación del instrumento al efectuar las mediciones. Recibe también el nombre de "Starret".

Regla de senos

La medición de ángulos puede resultar muy complicada en algunos casos, si se trata de realizar con transportador o goniómetro; por ello, para mayor exactitud se recomienda utilizar la regla o barra de senos que permite medir un ángulo cualquiera utilizando resoluciones trigonométricas con error menor a 5 minutos. Este instrumento se utiliza para la construcción de útiles, herramientas, en trazados, para efectuar ajustes, comprobaciones y otras operaciones que requieran gran exactitud en la medición u obtención de piezas angulares. La regla de senos (figura 2.74a), está constituida por una barra de acero (F) de alta resistencia al desgaste, cuidadosamente rectificada, de gran robustez, con agujeros (o) en su cuerpo para hacerla más liviana.

Sus dos extremos están rebajados y en cada uno se encuentra dispuesto, haciendo contacto con las superficies de los rebajes de

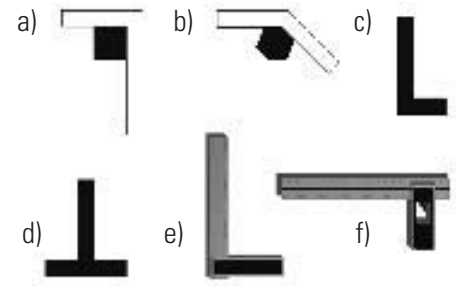


Figura 2.72 *Escuadras.*

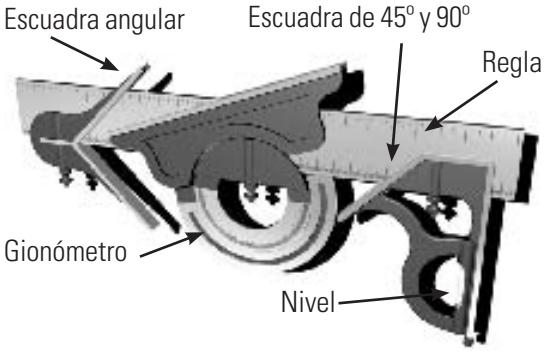


Figura 2.73 *Transportador universal.*

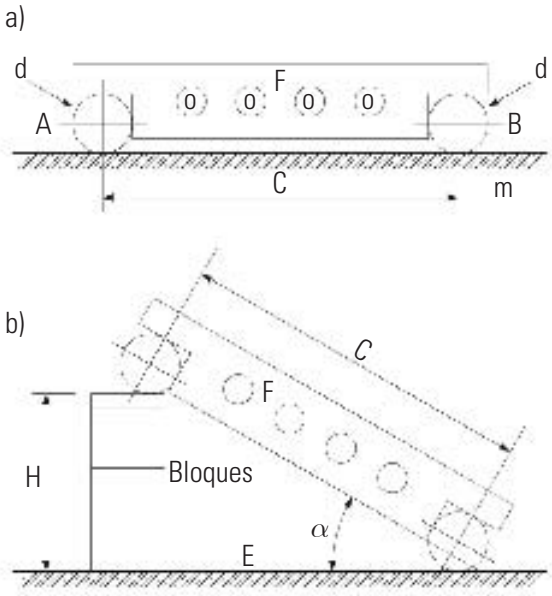


Figura 2.74 *Barra de senos.*

la barra, un cilindro (d) de acero especial templado, cementado y rectificado. Por tanto, la regla posee dos de estos cilindros, los cuales tienen igual diámetro y longitud y hacen contacto con las superficies de rebajes por dos de sus generatrices a 90°, al estar atornillados. Los centros de los cilindros se encuentran sobre una línea (A-B) exactamente paralela al eje de la barra y a sus superficies superior e inferior. La regla apoya sobre una mesa (m) de máquina herramienta o mármol de ajuste, por medio de la parte inferior de los cilindros siendo la precisión del paralelismo de las superficies de la regla y de la base de apoyo de ±0,001 mm. La excentricidad de los cilindros no debe exceder de 0,00075 mm por cada 25,4 mm de diámetro (0,00003 in por cada pulgada de diámetro).

Para efectuar la medición, la regla viene provista de un sistema de bloques patrón calibrados, denominados bloque patrón, calzas o escantillones, que se encuentran construidos de material especial de óptima calidad (INVAR), templado, perfectamente rectificados, rasqueteados y lapidadas sus superficies, con dos caras opuestas paralelas y planas y su precisión de fabricación es en función de sus dimensiones, que van desde 1/10 000 mm para los de 10 mm hasta 1/1 000 mm para un bloque patrón de 100 mm. Es tal el grado de perfección y calidad de estos bloques patrón que presentan las características distintivas de adherirse unos a otros cuando se unen por sus caras y no se separan sin un esfuerzo considerable, incluso se pueden mantener suspendidos como una barra sin que se separen.

Figura 2.75 *Barra o regla de senos.*

La medición de un ángulo con la regla de senos se efectúa de la manera siguiente (figura 2.74b): uno de los cilindros de la regla se apoya sobre la base (mármol E) y debajo del otro se agregan los bloques patrón de control, hasta una altura H para lograr el ángulo α deseado; teniendo en cuenta que la distancia entre los centros de los cilindros es una constante C, que puede ser de C = 100 mm y C = 200 mm o C = 5 in y C = 10 in, si es H la altura de los bloques y α el ángulo que forman las superficies de la regla con la base, se tendrá:

$$\text{sen } \alpha = \frac{H}{C} \Rightarrow H = C \text{ sen } \alpha$$

siendo C la constante del aparato. Sobre la superficie de la pieza cuyo ángulo se está midiendo se pasa un palpador y se corrige el ángulo modificando el tamaño de las galgas hasta que no se aprecien variaciones en el palpador al deslizarlo sobre la superficie (figura 2.75).

Ejemplo: se desea obtener un ángulo de 26°16', por tanto, se debe obtener con los bloques patrón, para C = 100 mm:

$$H = C \text{ sen } \alpha = 100\text{mm} \times \text{sen}\left(26^0 16'\right) = 44,25\text{mm}$$

Es decir, con los bloques patrón se debe lograr una altura de 44,25 mm. Los bloques patrón o escantillones se fabrican desde 0,25 mm hasta 100 mm, y pueden estar en centímetros, milímetros, in o múltiplos y submúltiplos de éstos.

Para ángulos muy pequeños, el valor de H es tan reducido que no se pueden efectuar las combinaciones necesarias. En este caso se colocan los bloques debajo de cada cilindro, logrando la disposición que se indica en la figura 2.76:

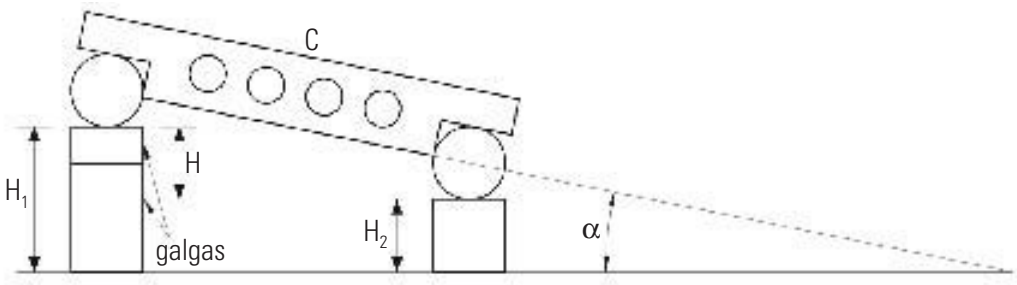


Figura 2.76 *Sustitución de galgas por bloques patrón.*

$$\text{a) } H = H_1 - H_2 \quad \text{b) } H = C \text{ sen } \alpha \therefore \text{ c) sen } \alpha = \frac{H}{C} \text{ siendo}$$

$$\alpha = \text{arcsen}\left(\frac{H}{C}\right)$$

Para conseguir ángulos de mucha precisión se utilizan mesas de senos que permiten dar a la pieza la inclinación correcta. Estas mesas pueden ser simples apoyos de la regla de senos (platos) o tratarse de dispositivos especiales como mesas de senos circulares articuladas o mesas inclinables hemisféricas.

▶ RESUMEN

En este capítulo presentamos los principales instrumentos y aparatos de medición dimensional, así como su clasificación en función a magnitudes lineales y angulares.

Hicimos énfasis en los pasos a realizar para llevar a cabo una medición confiable.

Se describió el manejo de los principales instrumentos de medición lineal haciendo hincapié en los cuidados que se deben tener con los instrumentos y en las precauciones a tomar para evitar posibles errores que se pueden cometer al momento de hacer una medición.

Se presentan algunos ejemplos de medición y los cálculos necesarios que hay que realizar para dar el resultado final.

BIBLIOGRAFÍA

NMX-Z-055-IMNC: 1996. Vocabulario de términos fundamentales y generales.

CAPÍTULO

3

Tolerancia y mediciones

Introducción
Dimensionamiento geométrico y tolerancias
Principio de máximo material (MMC)
Tipos de características geométricas
Características geométricas, símbolos y términos
Tolerancias
Resumen
Bibliografía

Introducción

En determinadas ocasiones, la especificación de tolerancias dimensionales resulta insuficiente para asegurar el correcto montaje y funcionamiento de mecanismos muy precisos o de piezas de grandes dimensiones, entre otros.

La figura 3.1 muestra tres casos en los que una de las piezas puede ser correcta desde el punto de vista dimensional (diámetros de las secciones dentro de tolerancia) pero no es apta para el montaje; en el primer caso hay un defecto de rectitud; en el segundo, uno de coaxialidad; y en el tercer caso, un defecto de perpendicularidad.

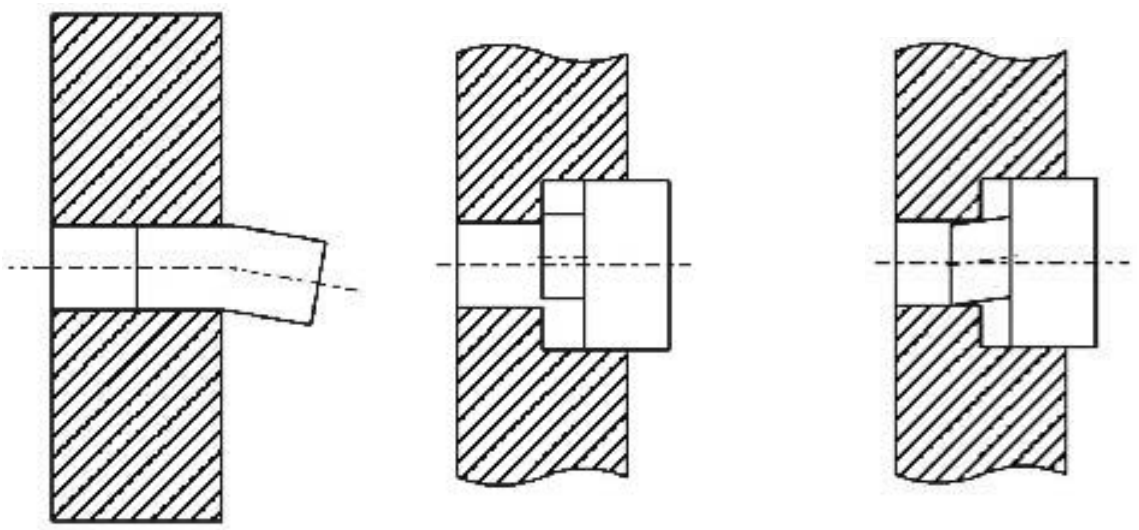


Figura 3.1 *Tipos de defectos en las piezas.*

Nótese que en la fabricación se producen irregularidades geométricas que pueden afectar la forma, posición y orientación de los diferentes elementos constructivos de las piezas.

Una tolerancia dimensional aplicada a una medida ejerce algún grado de control sobre desviaciones geométricas; por ejemplo, la tolerancia dimensional tiene efecto sobre el paralelismo y la planicidad. Sin embargo, en algunas ocasiones, la tolerancia de medida no limita de manera suficiente las desviaciones geométricas; por tanto, en estos casos se debe especificar una tolerancia geométrica, dando prioridad al control geométrico que ya lleva implícita la tolerancia dimensional.

La tolerancia geométrica de un elemento de una pieza (superficie, eje, plano de simetría, etc.) es la zona de tolerancia dentro de la cual debe estar contenido dicho elemento. Dentro de esta zona el elemento puede tener cualquier forma u orientación, excepto si hay alguna indicación más restrictiva.

El uso de tolerancias geométricas evita la aparición en los dibujos de observaciones como superficies planas y paralelas, con la evidente dificultad de interpretación cuantitativa que conllevan. A partir de los acuerdos internacionales sobre símbolos para las tolerancias geométricas, los problemas de lenguaje están siendo superados.

Las tolerancias geométricas deben especificarse sólo en aquellos requisitos que afecten a la funcionalidad, intercambiabilidad y posibles aspectos relacionados con la fabricación; de otra manera, los costos de fabricación y verificación sufrirían un aumento innecesario. En cualquier caso, estas tolerancias deberán ser tan grandes como lo permitan las condiciones establecidas para satisfacer los requisitos del diseño.

En este capítulo se presenta la relación entre diseño de ingeniería, producto e inspección de partes. El diseño de ingeniería se refiere a lo que se fabricará. El producto es lo que se fabricó. La inspección de partes es el proceso en el que se compara el producto con el diseño de ingeniería. El factor común que liga esos tres aspectos es el acotado geométrico y las tolerancias. Cuando las tolerancias dimensionales y geométricas se aplican adecuadamente se asegura la más económica y efectiva producción de partes.

Significado de tolerancia

Cuando se miden con precisión las características o partes de piezas en apariencia iguales, resulta que no existen dos piezas idénticas. Según los propósitos para las que sean fabricadas, todas las partes pueden variar dentro de ciertos límites y seguir siendo útiles. Es necesario entonces, encontrar la forma óptima de medir en los procesos. Si se utiliza una precisión excesiva, una parte de las cifras significativas deberá redondearse. Este tipo de mediciones afecta los costos de producción como sucede, por ejemplo, en la producción de bienes. Muy poca precisión produce malos productos y demasiada precisión provoca que los precios en el mercado se eleven. Por tanto, se requiere una expresión no ambigua de "suficientemente bueno". Esta expresión se denomina **tolerancia**. El uso de tolerancias geométricas permite, pues, un funcionamiento satisfactorio y la intercambiabilidad, aunque las piezas sean fabricadas en talleres diferentes y por distintos equipos y operarios.

Se denomina **tolerancia dimensional** a la anchura del intervalo de medidas permitido para una determinada dimensión. En metrología dimensional, las tolerancias se aplican a dimensiones de posición (donde) y de forma (qué tan grande). **UNE** 1 120 96, equivalente a ISO 406:1987, desarrolla los aspectos relativos a las tolerancias dimensionales (figura 3.2).

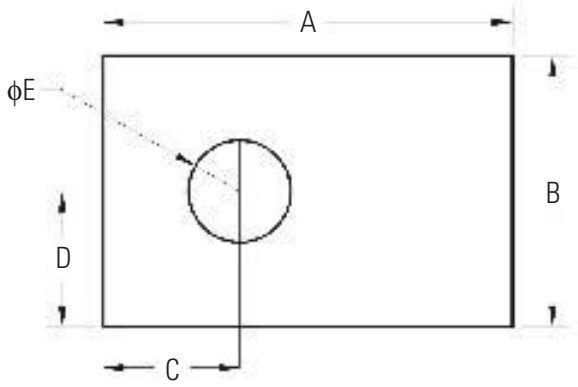


Figura 3.2 *Las tolerancias se aplican a dimensiones de forma (A, B y E) y dimensiones de posición (C y D).*

Dimensionamiento geométrico y tolerancias

Es un lenguaje universal de símbolos parecido al sistema de señales de tráfico que aconsejan al conductor cómo circular por las carreteras. Los símbolos del lenguaje GD&T (Por sus siglas en inglés, Geometric Dimensioning and Tolerancing) le sirven al ingeniero de diseño para describir de forma precisa y lógica características de la pieza, de manera que se pueden

fabricar e inspeccionar con precisión. Las palabras clave son función y relación. Este tipo de dimensionamiento se usa cuando:

1. Las características de la pieza son críticas para la funcionalidad y capacidad de intercambio.
2. Se requieren datos de referencia para asegurar la consistencia entre diseño, fabricación e inspección.
3. Se utilizan, o son deseables, las técnicas de computación.
4. La interpretación de tolerancias o estándares no está implícita.

Principio de máximo material (MMC)

Un principio fundamental del dimensionamiento geométrico es la condición de máximo material. La figura 3.3 permite comprender la condición de máximo material, obsérvese que el diámetro del eje es 15,70 cm, o su máximo valor permitido. Es fácil comprender porqué se llama la condición de máximo material.

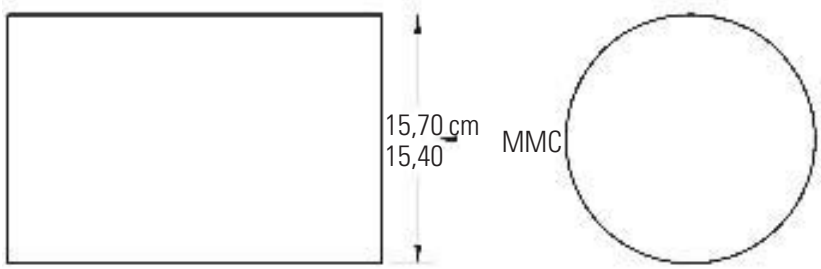


Figura 3.3 *Condición de máximo material (MMC) de una característica externa, como en este eje, cuyo diámetro máximo permisible es 15,70 cm.*

La condición de máximo material para un agujero se da cuando se tiene el mínimo tamaño permitido (figura 3.4). El diámetro de un agujero tiene la mayor cantidad de material en su diámetro mínimo. La condición de máximo material se cumple para el eje cuando tiene el máximo valor permitido.

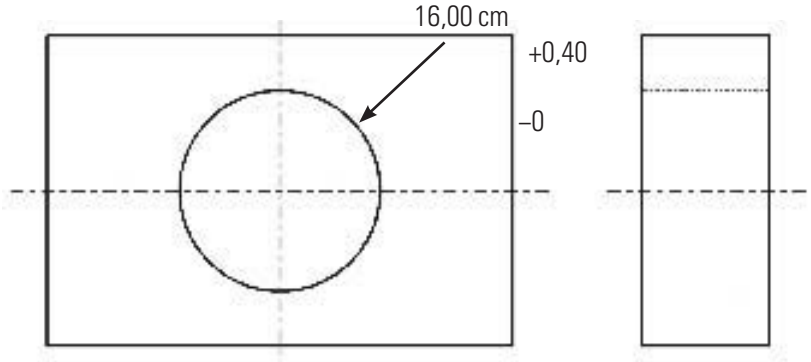


Figura 3.4 *Un agujero en la condición de máximo material tiene su mínimo tamaño posible, teniendo el "máximo material". En este caso, la condición de máximo material es 16,00 cm.*

El mismo principio existe tanto en el agujero como en el eje. Si las medidas efectivas de los elementos acoplados están lejos de los límites de máximo material, la tolerancia especificada de forma o posición puede aumentarse sin perjudicar la posibilidad de montaje. Al relacionar de esta manera las características de las partes se asegura su relación funcional y se establecen los criterios para determinar las tolerancias necesarias de forma, orientación y posición. La acotación Ø 16,00 MMC en el agujero significa que hay una forma perfecta en la frontera, así como en el eje en Ø 15,60. El símbolo de condición de material "Ⓜ" se utiliza en el marco de control de características para aplicar el principio MMC a las tolerancias geométricas especificadas para localizar los ejes y agujeros.

Tipos de características geométricas

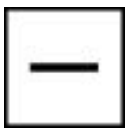
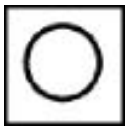
Existen cinco tipos de características geométricas:

1. **Tolerancia de forma.** Establece la cantidad permitida que una superficie o característica puede variar de la forma deseada implícita en el dibujo.
2. **Tolerancia de orientación.** Define la cantidad permitida que una superficie o característica puede variar respecto a un dato.
3. **Tolerancia de perfil.** Fija la cantidad permitida que una superficie o característica puede variar de la forma deseada en el dibujo o respecto a un dato.
4. **Tolerancia de control.** Determina la cantidad permitida que una superficie o característica puede variar de la forma deseada implícita en el dibujo durante una rotación completa (360°) de la pieza sobre un eje establecido.
5. **Tolerancia de posición.** Establece la cantidad permitida que una característica puede variar de la posición perfecta implícita en el dibujo con respecto a otro dato o característica.

Características geométricas, símbolos y términos

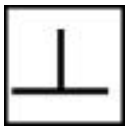
La tabla 3.1 muestra una lista de términos y símbolos comunes usados en dimensionamiento geométrico y tolerancias.

Tabla 3.1 Lista de términos y símbolos comunes.

	Rectitud. Es una condición en la que todos los puntos forman una línea recta. La tolerancia se especifica con la representación de dos líneas paralelas.
	Plano. Todos los puntos en una superficie están en un plano. La tolerancia se especifica con dos planos paralelos.
	Redondez o circularidad. Todos los puntos de una superficie forman un círculo. La tolerancia se especifica con la definición de dos círculos concéntricos.

Continúa

Continuación

	Cilindridad. Todos los puntos de una superficie son equidistantes a un eje común. Una tolerancia cilíndrica especifica una zona de tolerancia definida por dos cilindros concéntricos.
	Perfil. Es un método de tolerancia para controlar superficies irregulares, líneas, arcos o planos normales. Los perfiles se aplican a elementos de líneas individuales o a toda la superficie de la pieza. La tolerancia del perfil especifica un límite uniforme a lo largo del perfil real dentro del que se deben situar los elementos de la superficie.
	Angularidad. Es la condición de una superficie o eje que forma un ángulo específico (aparte de 90º) con otro eje o plano. La zona de tolerancia está definida por dos planos paralelos al ángulo básico específico desde el eje o plano de un dato.
	**Perpendicularidad.** Es la condición de una superficie o eje que forma un ángulo recto con otro plano o eje. La tolerancia de perpendicularidad especifica una zona definida por dos planos perpendiculares al otro plano o eje del dato o una zona definida por dos planos paralelos perpendiculares al eje del dato.
	Paralelismo. Es la condición de una superficie o eje equidistantes a todos los puntos desde el plano o eje del dato. La tolerancia del paralelismo especifica una zona definida por dos planos o líneas paralelas al plano o eje del dato o una zona de tolerancia cilíndrica cuyo eje es paralelo al eje de un dato.
	Concentricidad. Los ejes de todos los elementos locales cruzados de una superficie de revolución son comunes a la característica del eje del dato. La tolerancia de la concentricidad especifica una zona de tolerancia cilíndrica cuyo eje coincide con el eje del dato.
	Posición. Una tolerancia de posición define una zona en la que el eje central o plano central puede variar desde la posición real (teóricamente exacta). Las dimensiones básicas establecen la posición real a partir de las características de los datos y entre características interrelacionadas. Una tolerancia de posición es la variación total admisible entre la situación de una característica y su situación exacta. Para características cilíndricas, como agujeros y diámetros externos, la tolerancia de posición es, por lo general, el diámetro de la zona de tolerancia, donde se deben situar los ejes de la característica. Para las características que no sean redondeadas, como ranuras y lengüetas, la tolerancia de posición es el ancho de la zona de tolerancia donde se debe situar el centro del plano de la característica.
	Control circular. Permite controlar los elementos circulares de una superficie. La tolerancia se aplica de manera independiente a cualquier posición circular de medición ya que la pieza se puede rotar 360º. Una tolerancia de control circular aplicada a superficies construidas alrededor del eje de un dato controla las variaciones acumulativas de circularidad y axialidad. Cuando es aplicado a superficies construidas en ángulos rectos al eje del dato, se controlan elementos circulares de la superficie de un plano.
	Control total. Ofrece control de todos los elementos de la superficie. La tolerancia se aplica de forma simultánea a elementos circulares y longitudinales ya que la pieza se rota 360º. El control total permite controlar la variación acumulativa de circularidad, cilindridad, rectitud, coaxialidad, angularidad, conicidad y perfil siempre que se aplique a superficies construidas alrededor del eje de un dato. Cuando se aplica a superficies construidas en ángulo recto en relación con el eje del dato, controla las variaciones acumulativas de perpendicularidad y de plano.

Rectángulo de tolerancia

La indicación de las tolerancias geométricas en los dibujos se realiza por medio de un rectángulo dividido en dos o más compartimientos, los cuales contienen, de izquierda a derecha, la siguiente información:

- Símbolo de la característica a controlar.
- Valor de la tolerancia expresada en las mismas unidades utilizadas para el acotado lineal. Este valor está precedido por el símbolo Ø si la zona de tolerancia es circular o cilíndrica.
- Letra que identifica el elemento o elementos de referencia, si los hay.

∠	0,1

//	0,4	A

Ø	0,2	A	B

Figura 3.5 *Rectángulos de tolerancia*

Elemento controlado

El rectángulo de tolerancia se une al elemento controlado mediante una línea de referencia terminada en flecha, de la forma siguiente:

- Sobre el contorno del elemento o en su prolongación (pero no como continuación de una línea de cota), cuando la tolerancia se refiere a la línea o superficie en cuestión (figura 3.6).

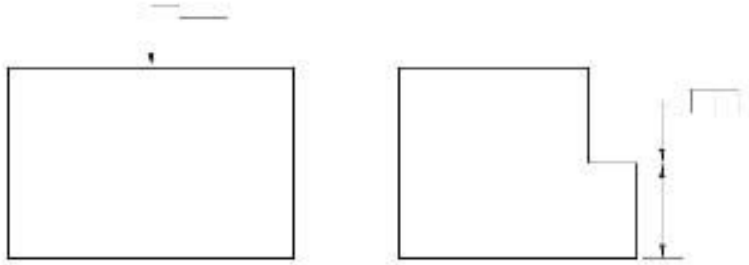


Figura 3.6 *Ejemplos publicados de cómo se une el rectángulo de tolerancia al elemento controlado sobre el contorno.*

- Como prolongación de una línea de cota, cuando la tolerancia se refiere al eje o plano de simetría del elemento en cuestión (figura 3.7).

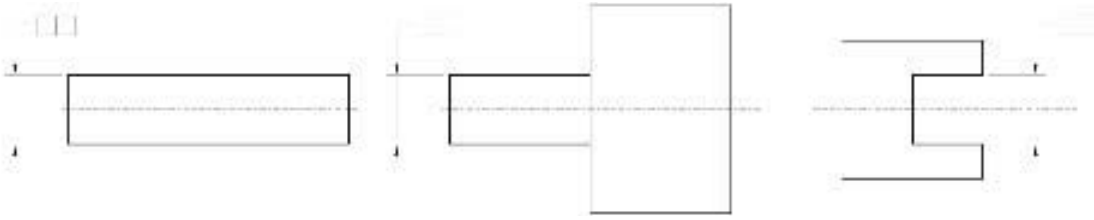


Figura 3.7 *Unión del rectángulo de tolerancia sobre el elemento controlado como prolongación de una línea de cota.*

- Sobre el eje, cuando la tolerancia se refiere al eje o plano de simetría de todos los elementos que lo tienen en común (figura 3.8).

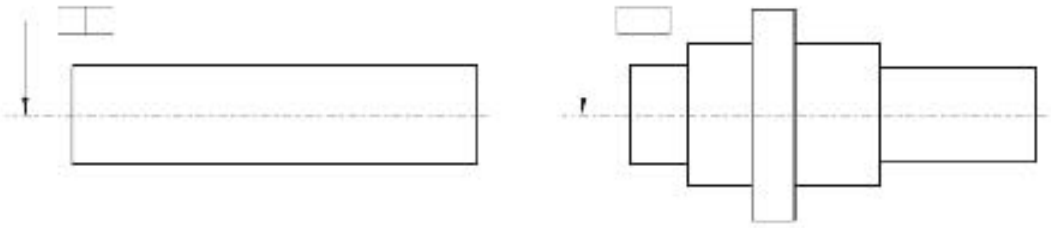


Figura 3.8 *Unión del rectángulo de tolerancia sobre el elemento controlado en el eje.*

Elementos de referencia

Cuando el elemento a controlar se relaciona con una referencia, ésta se identifica con una letra mayúscula colocada en un recuadro que está unido a un triángulo de referencia. La misma letra que identifica la referencia se repite en el rectángulo de tolerancia (figura 3.9).

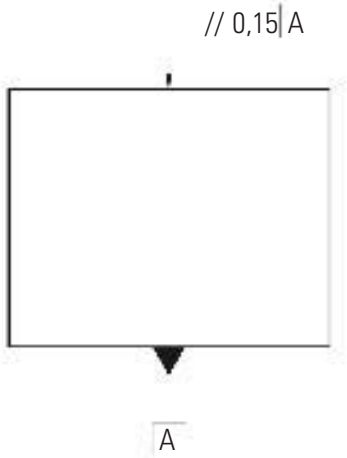


Figura 3.9 *Elementos de referencia. En este caso A identifica la referencia.*

Si el rectángulo de tolerancia se une de manera directa al elemento de referencia, la letra de referencia se puede omitir (figura 3.10).

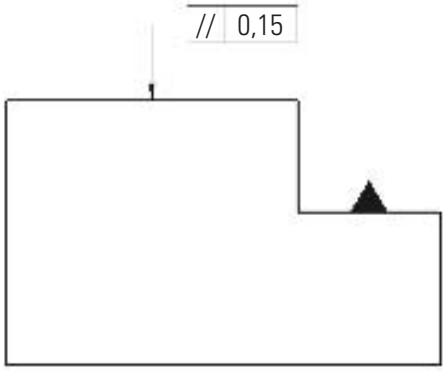


Figura 3.10

El triángulo y la letra de referencia se colocan:

- Sobre el contorno del elemento o en una prolongación del contorno (pero claramente separados de la línea de cota), cuando el elemento de referencia es la propia línea o superficie que define dicho contorno (figura 3.11).

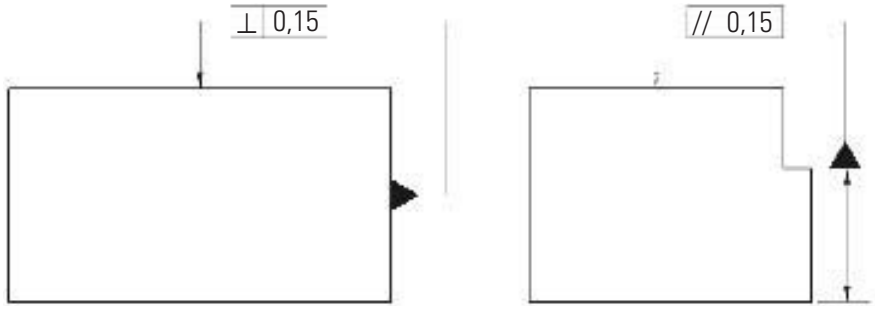


Figura 3.11

- Como una prolongación de la línea de cota cuando el elemento de referencia es el eje o plano de simetría del elemento en cuestión (figura 3.12).

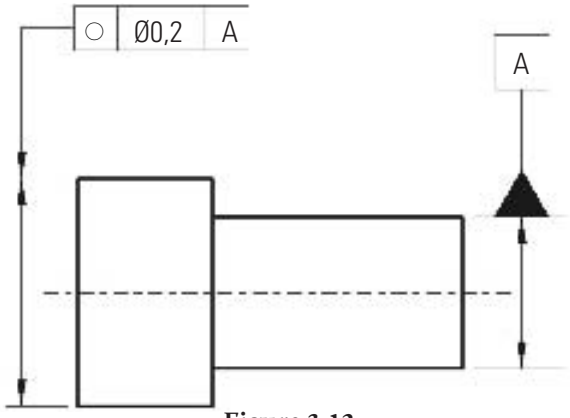


Figura 3.12

- Sobre el eje o plano de simetría cuando la referencia es el eje común o plano de simetría de todos los elementos que lo tengan en común (figura 3.13).

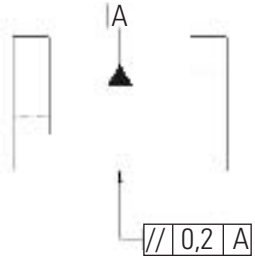


Figura 3.13

- Un sistema de referencias múltiples consiste en varios elementos de referencia. Si las referencias se aplican en un determinado orden, las letras mayúsculas de referencia deben colocarse en recuadros contiguos, en el mismo orden en que se deban aplicar (figura 3.14).

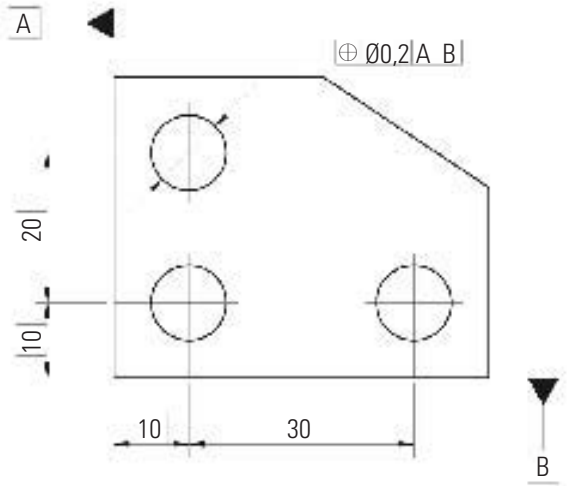


Figura 3.14

- Si las referencias múltiples no se aplican en un determinado orden, las letras mayúsculas de referencia se colocan juntas en el último recuadro del rectángulo de tolerancia (figura 3.15).

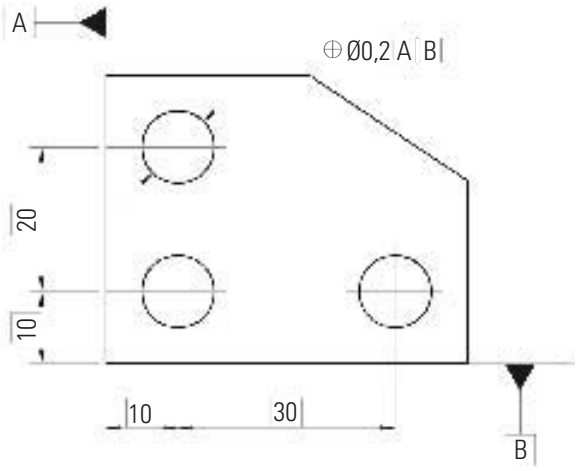


Figura 3.15

- Una referencia común formada por dos elementos de referencia se identifica con dos letras separadas por un guión (figura 3.16).

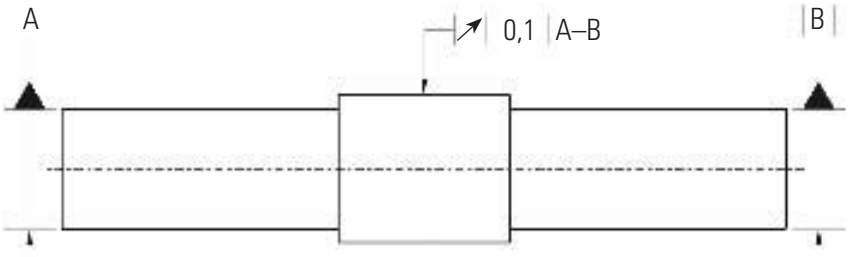


Figura 3.16

Especificaciones restrictivas

Las indicaciones restrictivas sobre la forma del elemento dentro de la zona de tolerancia se indican al lado del rectángulo de tolerancia (figura 3.17).

□	0,05	no cóncavo

□	0,05	no convexo

Figura 3.17

Cuando sea necesario especificar más de una tolerancia a un elemento, se dan las especificaciones en rectángulos colocados uno sobre otro.

○	0,01	
//	0,06	B

Figura 3.18

Cuando la tolerancia se aplica a una longitud parcial, en cualquier posición, el valor de dicha longitud se añade detrás del valor de la tolerancia, separado por una barra inclinada. Del mismo modo, si en lugar de una longitud, se trata de una superficie, se usa la misma indicación. En este caso, la tolerancia se aplica a cualquier línea de la longitud indicada, en cualquier posición y cualquier dirección (figura 3.19).

//	0,01/100	A

Figura 3.19

Cuando una especificación referida a un elemento completo se complemente con otra referida a una parte de dicho elemento, esta última se coloca debajo de la anterior, en otro recuadro (figura 3.20).

//	0,1	A
	0,01/100	

Figura 3.20

Si la tolerancia se aplica a una parte concreta del elemento, deberá dimensionarse con la ayuda de cotas y una línea gruesa de trazo y punto. Del mismo modo, cuando se toma como referencia sólo una parte de un elemento, se dimensiona con la ayuda de cotas y una línea gruesa de trazo y punto (figura 3.21).

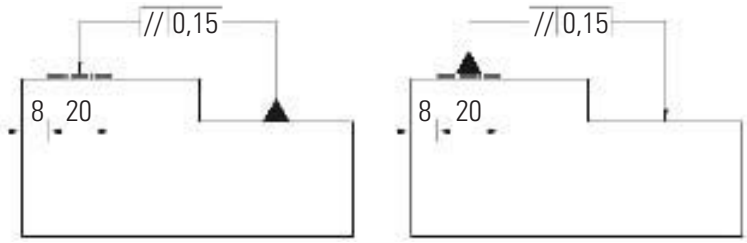


Figura 3.21

Cotas teóricamente exactas

En el caso de tolerancias de posición, orientación o forma de un perfil, las cotas que determinan respectivamente la posición, orientación o forma teóricamente exactas, no deben ser objeto de tolerancia. Tales dimensiones se colocan dentro de un recuadro (figura 3.22).

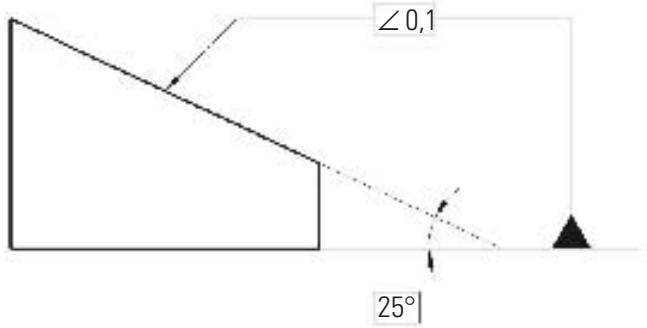


Figura 3.22

Tolerancias

Tolerancias de forma, orientación, perfil y control

Las tolerancias de forma, orientación, perfil y control establecen la cantidad permitida que una superficie o característica puede variar de la forma deseada implícita en el dibujo. Las expresiones de tolerancia de forma y orientación se refieren a planicidad, rectitud, circularidad, cilindricidad, paralelismo, perpendicularidad y angularidad. Las tolerancias de perfil de una superficie, el perfil de una línea, control circular y control total son variaciones únicas y combinaciones de forma, orientación, y algunas veces de posición y se consideran tipos separados de características.

Se deben especificar las tolerancias de forma, perfil o control desde características críticas hasta requisitos de diseño en las siguientes circunstancias:

1. Cuando las prácticas establecidas en el taller no son confiables y no proporcionan la precisión requerida.
2. Cuando los documentos que establecen estándares de trabajo convenientes no pueden prescribirse.
3. Cuando las tolerancias de tamaño y ubicación no proporcionan el control necesario.

Tolerancias de ubicación

Las tolerancias de ubicación establecen la cantidad permitida en la ubicación especificada de una característica que puede variar en relación con otra característica o dato. Estas tolerancias se refieren a las siguientes características geométricas: posición, simetría y concentricidad.

Las tolerancias de ubicación involucran características de tamaño y las relaciones de los centros del plano y los ejes. Para que las tolerancias de posición sean válidas se requieren al

menos dos características, una de las cuales es una característica de tamaño. Donde se involucre la función o la intercambiabilidad de la pieza se puede introducir ventajosamente el principio de máximo material.

▶ RESUMEN

En este capítulo presentamos la relación entre diseño de ingeniería, producto e inspección de partes; se define el concepto de tolerancia y se hace hincapié en la aplicación adecuada de los diferentes tipos de tolerancias para asegurar la más económica y efectiva producción de partes.

Se muestra el lenguaje universal de símbolos que sirven al ingeniero de diseño para describir de forma precisa las características de una pieza, de manera que se puedan fabricar e inspeccionar con precisión.

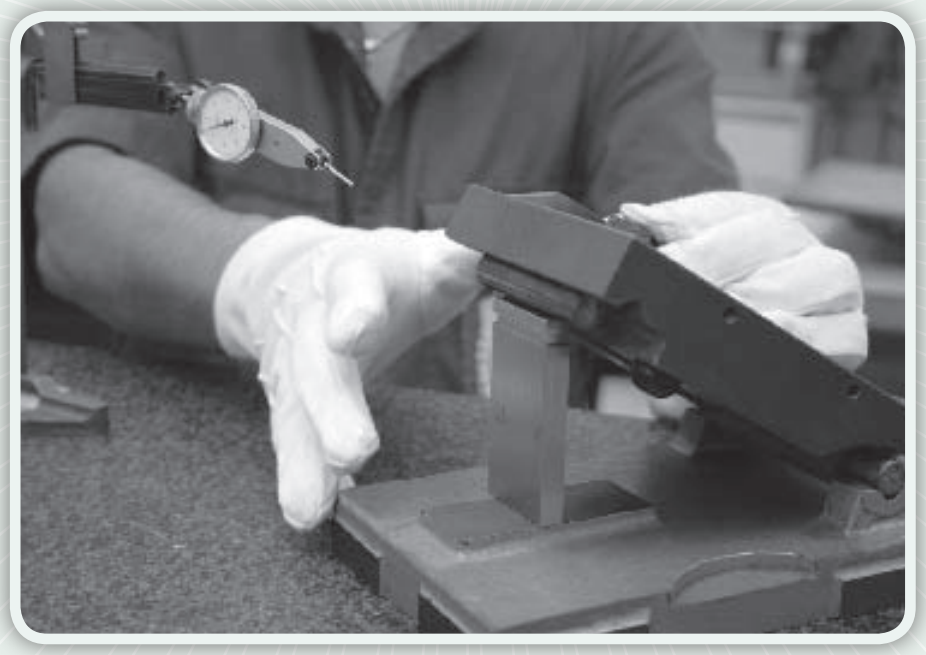
▶ BIBLIOGRAFÍA

NMX-Z-55-1986 Metrología - Vocabulario de términos fundamentales y generales (Derogada por la Ley Federal sobre Metrología y Normalización)

CAPÍTULO

4

Incertidumbres



Introducción
Definiciones
Errores, efectos y correcciones
Estimación de la incertidumbre de la medición
Documentación de un reporte de incertidumbre con la información apropiada
Resumen
Bibliografía

Introducción

Cuando se realizan mediciones, de alguna manera se duda de la validez de la medición. La diferencia entre el valor de la medición y el valor verdadero del parámetro que se está midiendo (el mensurando) se conoce como *error (de medición)*. El valor total de este error es la suma de la contribución de diversas fuentes de error. El parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían atribuirse razonablemente al mensurando, se conoce como **incertidumbre de medición**.

Aun cuando todas las componentes del error conocidas o supuestas, hayan sido evaluadas y se hayan aplicado las correcciones pertinentes, persiste una incertidumbre acerca de la confiabilidad del resultado expresado; es decir, se duda que el resultado de la medida represente adecuadamente el valor de la cantidad que se midió. Por esta razón se acuñó recientemente el concepto de incertidumbre como un atributo cuantificable, aun cuando los conceptos de error y análisis de error han sido parte de la práctica de la ciencia de la medición por mucho tiempo.

Así como el uso a nivel mundial del Sistema Internacional de Unidades (SI) ha otorgado coherencia a todas las mediciones científicas y tecnológicas, se ha alcanzado el consenso mundial para la evaluación y expresión de las incertidumbres en las mediciones, al aprobarse en 1986 la *Guía BIPM-ISO para la expresión de las incertidumbres en las mediciones*, lo que permite dar significado a una gran variedad de resultados de medición en la ciencia, la ingeniería, el comercio, la industria y la normalización, haciéndolas entendibles y logrando que se interpreten apropiadamente. En esta época de globalización de las economías internacionales, es indispensable que el método para evaluar y expresar las incertidumbres se estandarice en todo el mundo, logrando con ello que las mediciones realizadas en diferentes países puedan compararse fácilmente.

El método ideal para evaluar y expresar la incertidumbre del resultado de una medición debe ser universal, es decir, debe ser aplicable a cualquier tipo de mediciones y cualquier tipo de datos utilizados en las mediciones.

La cantidad utilizada para expresar la incertidumbre debe ser:

Internamente consistente: debe poder obtenerse directamente a partir de las componentes que contribuyen a la incertidumbre, asimismo, debe ser independiente de la forma en que dichas componentes sean agrupadas y del método en que éstas se descomponen en subcomponentes.

Transferible: debe ser posible utilizar directamente la incertidumbre evaluada para un resultado, como una componente al evaluar la incertidumbre de otra medida en la cual se utiliza el primer resultado.

Adicionalmente, en muchas aplicaciones industriales y comerciales, así como en las áreas de salud y seguridad, frecuentemente es necesario proporcionar un intervalo, centrado en el resultado de la medición, que contenga una fracción considerable de la distribución de valores que pueden ser razonablemente atribuidos a la cantidad que se está midiendo. Por tanto, el método ideal para evaluar y expresar la incertidumbre en la medición debe ser capaz de proporcionar directamente tal tipo de intervalo, en particular, uno con una probabilidad de cobertura o nivel de confianza que corresponda en forma realista con lo requerido.

Para estimar la incertidumbre de la medición es necesario ser muy cuidadoso y hacer algunas consideraciones. Hay varias razones por las que es importante determinar la incertidumbre de la medición:

- Estima el error asociado con la medición en un valor numérico.
- Proporciona un nivel de confianza en la medición.
- Es una buena práctica.
- Es un requisito para laboratorios acreditados.

En este capítulo se describe el proceso para determinar la incertidumbre de la medición en un entorno de ensayos y calibración.

Definiciones

Incertidumbre (de la medición) [NMX-Z-055-IMNC]

Parámetro asociado con el resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores, que razonablemente pudiera ser atribuida al mensurando.

Ésta es una definición operacional que se enfoca en el resultado de la medición y su incertidumbre evaluada. Sin embargo, no es inconsistente con otros conceptos de incertidumbre de medición:

- Una medida del posible error en el valor estimado del mensurando proporcionado por el resultado de una medición.
- Una estimación que caracteriza el intervalo de valores dentro de los cuales se halla el valor verdadero de un mensurando.

Aunque estos dos conceptos tradicionales son válidos como ideales, ellos se enfocan a magnitudes desconocidas: el error del resultado de una medición y el *valor verdadero* del mensurando (en contraste con su valor estimado), respectivamente. No obstante, cualquiera que sea el concepto de incertidumbre que se adopte, una componente de incertidumbre siempre se evalúa usando los mismos datos e información relacionada.

Incertidumbre estándar [NMX-Z-055-IMNC]

Incertidumbre del resultado de una medición expresada como una desviación estándar.

Evaluación (de incertidumbre) Tipo A [NMX-Z-055-IMNC]

Método para evaluar la incertidumbre mediante el análisis estadístico de una serie de observaciones.

Evaluación (de incertidumbre) Tipo B [NMX-Z-055-IMNC]

Método para evaluar la incertidumbre por otro medio que no sea el análisis estadístico de una serie de observaciones.

Incertidumbre estándar combinada [NMX-Z-055-IMNC]

Incertidumbre estándar del resultado de una medición cuando el resultado se obtiene a partir de los valores de algunas otras magnitudes ponderadas considerando el resultado de la medición que varía respecto a cambios en estas magnitudes.

Incertidumbre expandida [NMX-Z-055-IMNC]

Cantidad que define un intervalo alrededor de una medición del que se puede esperar que abarque una fracción grande de la distribución de valores que razonablemente pudieran ser atribuidos al mensurando.

Factor de cobertura [NMX-Z-055-IMNC]

Factor numérico usado como multiplicador de la incertidumbre estándar combinada con el propósito de obtener una incertidumbre expandida.

Errores, efectos y correcciones

En general, una medición tiene imperfecciones que dan origen a error en el resultado de la medición. Tradicionalmente, se considera que un error tiene dos componentes llamadas; *componente aleatoria* y *componente sistemática*.

Un error aleatorio presumiblemente se presenta por variaciones impredecibles o estocásticas, temporales y espaciales de las magnitudes de influencia. Los efectos de estas variaciones dan origen a las variaciones en observaciones repetidas del mensurando. Sin embargo, es imposible compensar el error aleatorio del resultado de una medición; usualmente puede reducirse incrementando el número de observaciones. Su esperanza o valor esperado es cero.

El *error sistemático*, al igual que el error aleatorio, no puede ser eliminado, pero a menudo se logra reducir. Si un error sistemático se presenta como consecuencia de un efecto reconocido de una magnitud de influencia en el resultado de una medición, el efecto puede cuantificarse, y si es significativo en relación con la exactitud requerida de la medición, puede aplicarse una corrección o un factor de corrección para compensar el efecto. Se supone que después de la corrección, la esperanza o valor esperado del error originado por un efecto sistemático es cero.

El resultado de una medición debe ser corregido para todos los efectos sistemáticos significativos reconocidos y no deben escatimarse esfuerzos para identificar estos efectos.

Estimación de la incertidumbre de la medición

El proceso de la estimación de la incertidumbre se puede llevar a cabo con los siguientes siete pasos:

1. Identificar las incertidumbres en los procesos de medición.
2. Evaluar y clasificar los tipos de incertidumbre (tipo A o B).

3. Cuantificar (evaluar y calcular) las incertidumbres individuales por varios métodos.
4. Documentar en un presupuesto de incertidumbre.
5. Combinar las incertidumbres.
6. Asignar el factor de cobertura *k* apropiado a la incertidumbre combinada para reportar la incertidumbre expandida.
7. Documentar un reporte de incertidumbre con la información apropiada.

Identificación de las incertidumbres en los procesos de medición

Es necesario ser muy meticuloso al momento de identificar los factores que afectan la medición. Quienes intervienen en el proceso, técnicos o ingenieros deben aportar ideas para identificar todas las posibles fuentes de incertidumbre. Algunos ejemplos de los factores que afectan la medición son:

- Definición incompleta del mensurando.
- Realización imperfecta de la definición del mensurando.
- Muestreos no representativos –la muestra medida puede no representar el mensurando definido.
- Los efectos de las condiciones ambientales sobre las mediciones, o mediciones imperfectas de dichas condiciones ambientales.
- Errores de apreciación del operador en la lectura.
- Resolución del instrumento o umbral de discriminación.
- Valores inexactos de patrones de medición y materiales de referencia.
- Valores inexactos de constantes y otros parámetros obtenidos de fuentes externas y usadas en los algoritmos de reducción de datos.
- Aproximaciones y suposiciones incorporadas en los métodos y procedimiento de medición.
- Variaciones en observaciones repetidas del mensurando en condiciones aparentemente iguales.

Estos factores no son necesariamente independientes. Por supuesto, un efecto sistemático no puede ser tomado en cuenta en la evaluación de la incertidumbre del resultado de una medición pero contribuye a su error.

Evaluación y clasificación de los tipos de incertidumbre (tipo A o tipo B)

La recomendación INC-1 (1980) del Grupo para la Expresión de Incertidumbres agrupa a las componentes de incertidumbre en dos categorías. Esta clasificación se basa en los métodos de evaluación empleados, a saber, A y B. Estas categorías se aplican a la incertidumbre y no son sustitutos para las palabras *aleatorio* y *sistemático*. La incertidumbre de una corrección para un efecto sistemático conocido se puede obtener en algunos casos mediante una evaluación del tipo A, y una evaluación del tipo B en algunos otros, según como pueda caracterizar la incertidumbre al efecto aleatorio.

El propósito de la clasificación tipo A y tipo B es indicar las dos diferentes maneras de evaluar componentes de incertidumbre y se da por conveniencia de discusión solamente. La clasificación no significa que exista alguna diferencia en la naturaleza de las componentes que resultan de cada uno de los dos tipos de evaluación; ambos están basados en **distribuciones de probabilidad** y las componentes de incertidumbre resultantes de cualquier tipo son cuantificadas por varianzas y desviaciones estándar.

La varianza estimada u^2 que caracteriza a una componente de incertidumbre obtenida de una evaluación tipo A se calcula mediante series de observaciones repetidas y es la varianza estimada estadística familiar s^2. La desviación estándar estimada u, la raíz cuadrada positiva de u^2, es entonces $u = s$ y por conveniencia algunas veces se denomina *incertidumbre estándar tipo A*. Para una componente de incertidumbre obtenida de una evaluación tipo B, la varianza estimada u^2 se evalúa mediante el uso de la información disponible, y la desviación estándar estimada u algunas veces es llamada incertidumbre estándar tipo B. Entonces la incertidumbre estándar tipo A se obtiene de una **función de densidad de probabilidad** deducida de una **distribución de frecuencia** observada, mientras que la incertidumbre estándar tipo B se obtiene de una función de densidad de probabilidad supuesta basada en el grado de creencia de que un evento pueda ocurrir (a menudo llamada **probabilidad subjetiva**). Ambas aproximaciones emplean interpretaciones de probabilidad reconocidas.

En la mayoría de los casos, el mensurando Y no se mide directamente, sino que se determina a partir de otras N magnitudes $X_1, X_2,\ldots, X_N$, a través de una relación funcional f:

$$y = F\left(X_1, X_2,..., X_N\right) \qquad (4.1)$$

Los argumentos $X_1, X_2,\ldots, X_N$, de los cuales depende el resultado de la medición Y, pueden visualizar a su vez como mensurandos y dependen de otras magnitudes, incluyendo correcciones y factores de corrección para efectos sistemáticos. Todo ello da lugar a complicadas relaciones funcionales f que pudieran nunca ser expresadas explícitamente. Adicionalmente, f puede ser determinada experimentalmente o existir sólo como un algoritmo que deba ser evaluado numéricamente. La función f debe interpretarse en el sentido más amplio, es decir, como aquella función que contiene cada magnitud, incluyendo todas las correcciones y factores de corrección, que contribuye con componentes significativos de incertidumbre al resultado de la medición.

Por tanto, si los datos indican que f no modela la medición al grado impuesto por la exactitud requerida del resultado de medición, entonces es necesario incluir argumentos adicionales en f para eliminar el problema. Esto puede requerir la introducción de un argumento que sirva para reflejar la carencia de conocimiento de un fenómeno que afecta al mensurando.

El conjunto de argumentos $X_1, X_2,\ldots, X_N$ se divide en las siguientes categorías:

- **Magnitudes cuyos valores e incertidumbres se determinan directamente en la medición.** Estos valores e incertidumbres se obtienen, por ejemplo, de una sola observación, de observaciones repetidas o por juicio basado en la experiencia, y pueden involucrar la determinación de correcciones en la lectura de los instrumentos y correcciones debidas a la presencia de magnitudes cuya influencia deba ser tomada en cuenta, como la temperatura ambiente, la presión barométrica y la humedad.

- **Magnitudes cuyos valores e incertidumbres son incorporados a la medición y que provienen de fuentes externas.** Estas magnitudes están asociadas con patrones de medición calibrados, materiales de referencia certificados y datos de referencia obtenidos de manuales.

Una estimación del mensurando *Y*, denotada como *y*, se obtiene de la ecuación 4.1 usando los argumentos estimados $X_1, X_2,\ldots, X_N$ para los valores de las *N* cantidades $X_1, X_2,\ldots, X_N$. Por tanto, la estimación de la magnitud resultante y, que es el resultado de la medición, está dada por

$$y = \left(x_1, x_2,..., x_n\right) \qquad (4.2)$$

Evaluación tipo A de la incertidumbre estándar

En la mayoría de los casos, la mejor estimación disponible de la esperanza o valor esperado μ_q de una magnitud *q* que varía aleatoriamente, y de la cual se han obtenido *n* observaciones independientes q_k en las mismas condiciones de medición, es la media aritmética o promedio $\overline{q}$ de las *n* observaciones

$$\overline{q} = \frac{1}{n}\sum_{k\,s\,1}^{n} q_k \qquad (4.3)$$

Por tanto, para un argumento X_i estimado a partir de *n* observaciones repetidas independientes $X_{i,k}$ la media aritmética obtenida de la ecuación 4.3 se usa como la estimación del argumento, x_i, en la ecuación 4.2 para determinar el resultado de la medición *y*; es decir, $x_i = \overline{X}_i$. Aquellos argumentos no evaluados a partir de observaciones repetidas deben obtenerse por otros métodos.

Las observaciones individuales q_k difieren en valor debido a las variaciones aleatorias en las magnitudes que las afectan, es decir, debido a efectos aleatorios. La varianza experimental de las observaciones, la cual estima la varianza s^2 de la distribución de probabilidad de *q*, está dada por:

$$s^2\left(q_k\right) = \frac{1}{n-1}\sum\nolimits_{k-1}^{n}\left(q_k - \overline{q}\right)^2 \qquad (4.4)$$

Esta estimación de la varianza y su raíz cuadrada positiva $s(q_k)$, denominada **desviación estándar experimental**, caracterizan a la variabilidad de los valores observados q_k, o más específicamente, su dispersión alrededor de la media $\overline{q}$.

La mejor estimación de $\sigma^2\left(\overline{q}\right) = \sigma^2/n$, la varianza de la media, está dada por:

$$s^2\left(\overline{q}\right) = \frac{s^2\left(q_k\right)}{n} \qquad (4.5)$$

La varianza experimental de la media $s^2\left(\overline{q}\right)$ y la desviación estándar experimental de la media $s\left(\overline{q}\right)$, que es igual a la raíz cuadrada positiva de $s^2\left(\overline{q}\right)$, cuantifican qué tan bien estima el valor esperado *Mq* de *q*, y cualquiera de ellas puede usarse como una medida de la incertidumbre de $\overline{q}$.

Por tanto, para un argumento X_i determinado a partir de *n* observaciones independientes repetidas $X_{i,k}$, la incertidumbre estándar $u(x_i)$ de su estimación $x_i =$ es $u\left(x_i\right) = s\left(\overline{X}_i\right)$ donde

$s^2\left(\overline{X}_i\right)$ se calcula de acuerdo con la ecuación 4.5. Por conveniencia, $u^2\left(x_i\right) =$ y $u\left(x_i\right) = s\left(\overline{X}_i\right)$ son llamadas varianza tipo A e incertidumbre estándar tipo A, respectivamente.

Los grados de libertad ν_i de $u\left(x_i\right)$, que son n-1 en el caso simple en que $x_i = \overline{X}_i$ y $u\left(x_i\right) = s\left(\overline{X}_i\right)$ y que se calculan a partir de n observaciones independientes, deben expresarse siempre cuando se documentan las evaluaciones de las componentes de incertidumbre tipo A.

La tabla 4.1 muestra un ejemplo del cálculo de la incertidumbre tipo A.

Tabla 4.1 Incertidumbre tipo A.

n	**Medición**
1	27,34
2	27,27
3	27,26
4	27,30
5	27,31
6	27,32
7	27,30
8	27,34
9	27,31
10	27,29
Suma $\sum_{K=1^{x}k}^{10}$	273,04
Media aritmética $\left(\overline{X}_K\right)$	27,30
Desviación estándar $s^2\left(9_K\right)$	0,026
Desviación estándar $s_2\left(\overline{9}\right)$	0,003

Evaluación tipo B de la incertidumbre estándar

Para una estimación x_i de un argumento X_i que no se obtuvo de observaciones repetidas, la varianza estimada asociada $u^2(x_i)$ o la incertidumbre estándar $u(x_i)$ se evalúan mediante juicios y criterios científicos basados en toda la información disponible sobre la variabilidad de X_i. Esta información puede incluir:

- Datos de fuentes externas con incertidumbres declaradas (provenientes de manuales).
- Datos de mediciones anteriores con otras incertidumbres (experimentos previos).
- Datos de los materiales e instrumentos de referencia.

- Experiencia con el conocimiento general de las características y el comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos relevantes.
- Especificaciones de los fabricantes.
- Datos obtenidos de los certificados de calibración y otros tipos de certificados.
- Aproximaciones de los modelos matemáticos relacionados con el mensurando.
- Resolución de los instrumentos.

Por conveniencia, $u^2(x_i)$ y $u(x_i)$, evaluadas de este modo, se denominan *varianza tipo B* e *incertidumbre estándar tipo B*, respectivamente.

El uso adecuado de la información disponible para una evaluación tipo B de la incertidumbre estándar requiere una visión basada en la experiencia y el conocimiento general, y es una habilidad que se aprende con la práctica. Una evaluación de incertidumbre estándar tipo B puede ser tan confiable como una evaluación tipo A, especialmente en una situación en donde una evaluación tipo A se base en un número relativamente pequeño de observaciones estadísticamente independientes.

Si la estimación x_i se toma de una especificación del fabricante, de un informe de calibración, manual, u otra fuente, y su incertidumbre asignada se establece como un múltiplo particular de una desviación estándar, la incertidumbre estándar $u(x_i)$ es simplemente el valor asignado dividido entre el multiplicador, y la varianza estimada $u_2(x_i)$ es el cuadrado de dicho cociente.

La incertidumbre asignada a x_i no necesariamente está dada como un múltiplo de una desviación estándar. En lugar de eso, puede encontrarse que la incertidumbre asignada define un intervalo con un nivel de confianza de 90, 95 o 99%. A menos que se indique otra cosa, puede suponer que se usó una distribución normal para calcular la incertidumbre asignada y recuperar la incertidumbre estándar de x_i dividiendo la incertidumbre asignada entre el factor apropiado para la distribución normal. Los factores correspondientes a los tres niveles de confianza mencionados son 1,64; 1,96 y 2,58.

Considere el caso en el que, con base en la información disponible, es posible establecer que existe una probabilidad de 50% de que el valor del argumento X_i se encuentre en un intervalo de a_- hasta a_+.

Si puede suponerse que la distribución de valores posibles de X_i es aproximadamente normal, entonces la mejor estimación x_i de X_i puede tomarse como el punto medio de tal intervalo. Adicionalmente, si la mitad del ancho del intervalo se denota como $a = (a+ - a-)/2$, se puede tomar $u(x_i) = 1{,}48a$, porque para una distribución normal con valor esperado μ y desviación estándar σ, el intervalo $\mu \pm \sigma/1{,}48$ incluye aproximadamente a 50% de la distribución.

Considere un caso en el que, con base en la información disponible, es posible establecer que "existen alrededor de dos de cada tres posibilidades de que el valor de X_i se encuentre en el intervalo de a_- hasta a_+" (en otras palabras, la probabilidad de que X_i esté dentro de ese intervalo es alrededor de 0,67). Entonces razonablemente es posible tomar $u(x_i) = a$, porque para una distribución normal con esperanza μ y desviación estándar σ el intervalo $\mu \pm \sigma$ comprende alrededor de 68,3% de la distribución (figura 4.1).

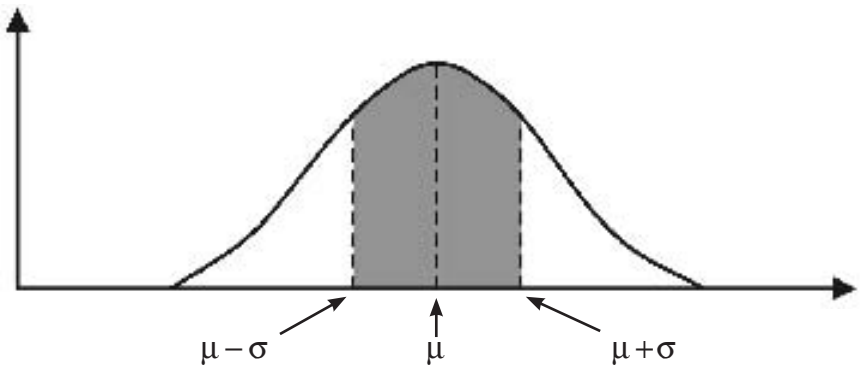


Figura 4.1 *Gráfica de la distribución normal.*

En otros casos podría ser posible estimar sólo los límites (superior e inferior) para X_i, en particular, a fin de establecer que la probabilidad de que el valor de X_i esté dentro del intervalo de a_- hasta a_+ para todos los propósitos prácticos es igual a 1 y la probabilidad de que X_i tome cualquier valor dentro del intervalo es igualmente probable (una distribución uniforme o rectangular de valores posibles). Entonces x_i la esperanza o el valor esperado de X_i, es el punto medio del intervalo $x = (a_- + a_+)/2$, con varianza asociada.

$$u2\left(x_i\right) = \frac{\left(a_+ - a_-\right)^2}{12} \tag{4.6}$$

Si la diferencia entre los límites, $a_+ - a_-$, se denota por $2a$, entonces la ecuación 4.6 se convierte en

$$u_2\left(x_i\right) = \frac{a^2}{3} \tag{4.7}$$

Los límites superior e inferior, a_+ y a_-, respectivamente, del argumento X_i podrían no ser simétricos con respecto a su mejor estimación x_i. Más específicamente, si el límite inferior se escribe como $a_- = x_i - b_-$, y el límite superior como $a_+ = x_i + b_+$, entonces $b_- \neq b_+$. Debido a que en este caso x_i (que se supone es la esperanza de X_i) no está en el centro del intervalo de a_- hasta a_+, la distribución de probabilidad de X_i no puede ser uniforme en todo el intervalo. Sin embargo, podría no haber suficiente información disponible para escoger una distribución adecuada; diferentes modelos conducirán a diferentes expresiones para la varianza. En ausencia de tal información la aproximación más simple es

$$u^2\left(x_i\right) = \frac{\left(b_+ + b_-\right)^2}{12} = \frac{\left(a_+ - a_-\right)^2}{12} \tag{4.8}$$

lo cual es la varianza de una distribución rectangular con ancho $b_+ + b_-$.

Es conveniente utilizar esta distribución, por ejemplo, cuando se están realizando mediciones y la escala es analógica o digital, entonces la varianza asociada a la resolución del instrumento se calcula convenientemente asociándole la distribución rectangular (figura 4.2).

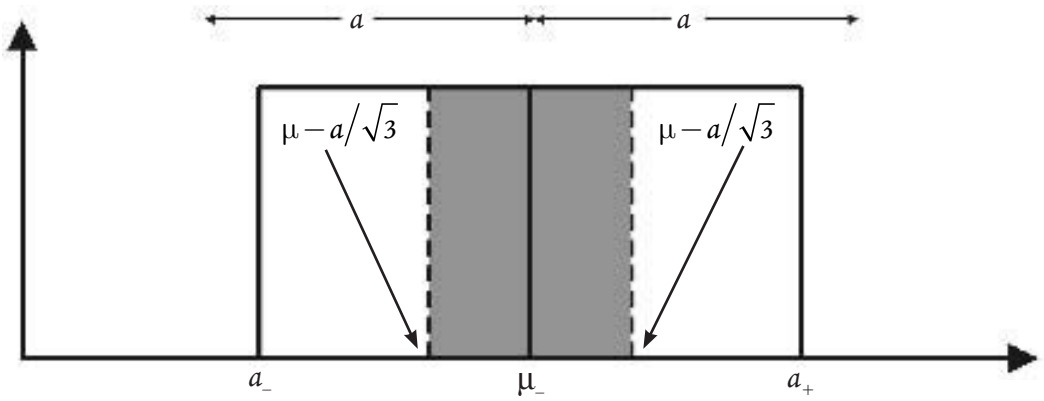


Figura 4.2 *Gráfica de la distribución rectangular.*

Cuando no hay conocimiento específico acerca de los posibles valores de X_i dentro de sus límites estimados a_- y a_+, es posible suponer únicamente que para X_i es igualmente probable tomar cualquier valor dentro de estos límites, con probabilidad cero de caer fuera de ellos. En muchos casos es más realista esperar que los valores cercanos a los límites sean menos probables que aquellos que están cerca del punto medio. Entonces podemos reemplazar la distribución rectangular simétrica con una distribución trapezoidal simétrica con igual pendiente en ambos lados (un trapezoide isósceles), una base inferior de longitud $a_+ - a_- = 2a$, y una base superior de longitud $2a\beta$, donde $0 \leq \beta \leq 1$. Conforme $b \rightarrow 1$ esta distribución trapezoidal se aproxima a la distribución rectangular, mientras que para $b = 0$ ésta es una distribución triangular (figura 4.3). Suponiendo tal distribución trapezoidal para X_i, se encuentra que la esperanza de X_i es $x_i = (a_- + a_+)/2$ y su varianza asociada es:

$$u^2(x_i) = \frac{a^2(1+\beta)^2}{6} \qquad (4.9a)$$

la cual se convierte para la distribución triangular, con $\beta = 0$, en

$$u^2(x_i) \frac{a^2}{6} \qquad (4.9b)$$

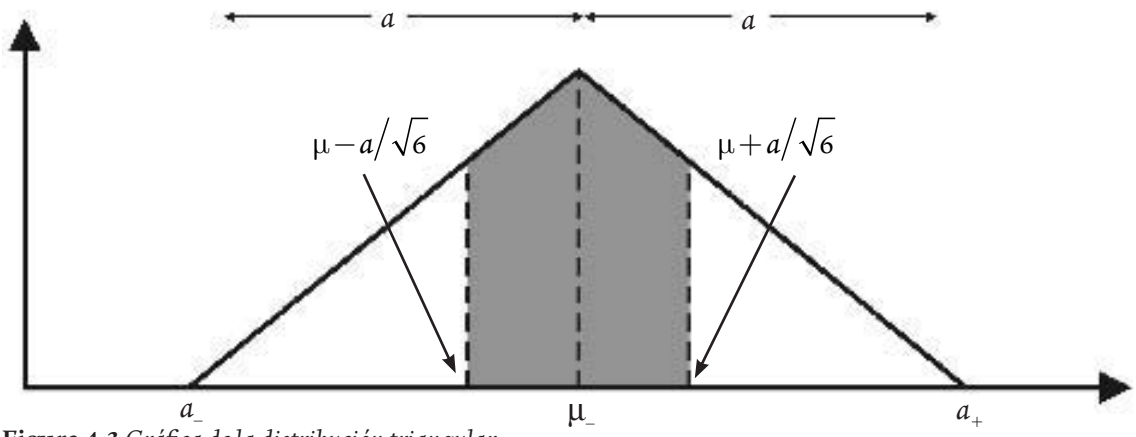


Figura 4.3 *Gráfica de la distribución triangular.*

Es conveniente utilizar esta distribución, por ejemplo, cuando se utiliza un valor convencionalmente verdadero o se materializa algún parámetro físico que ha sido caracterizado. Entonces, se puede suponer que el valor utilizado sigue una distribución triangular.

Cuantificación (evaluación y cálculo) de las incertidumbres individuales por varios métodos

Es importante no "contar dos veces" las componentes de la incertidumbre. Si una componente de incertidumbre que resulta de un efecto en particular se obtiene a partir de una evaluación tipo B, debería incluirse como una componente independiente de incertidumbre en el cálculo de la incertidumbre estándar combinada del resultado de la medición únicamente si el efecto no contribuye a la variabilidad apreciada en las observaciones. Esto es así porque la incertidumbre debida a la porción del efecto que contribuye a la variabilidad observada está ya incluida en la componente de incertidumbre obtenida a partir del análisis estadístico de las observaciones.

Cuando se hace una o más series de mediciones, la *distribución normal* siempre se asocia a las incertidumbres tipo A. Como ejemplo para calcular la componente tipo A de la incertidumbre, consideremos las mediciones realizadas en el punto de hielo (medición de la temperatura del agua durante el cambio de fase sólido-líquido), por tres técnicos. El valor convencionalmente verdadero del punto de hielo es 0,0 °C (tabla 4.2).

Tabla 4.2 Incertidumbre tipo A.

Número de medición [n]	1	2	3	Media
1	0,03	0,02	–0,01	0,04
2	0,01	0,02	–0,01	0,02
3	0,00	0,01	–0,02	–0,01
4	0,01	0,02	–0,03	0,00
5	0,02	0,04	–0,02	0,04
6	0,02	0,05	–0,02	0,05
7	0,03	0,03	–0,01	0,05
8	0,01	0,03	-0,02	0,02
9	0,02	0,03	-0,03	0,02
10	0,01	0,02	-0,03	0,00
Suma $\left(\sum_{k=1}^{10} x_k\right)$				0,23
Media aritmética $\left(\overline{x}_k\right)$				0,02
Desviación estándar $s^2\left(q_k\right)$				0,022
Desviación estándar $s^2\left(\overline{q}\right)$				0,012

La *distribución rectangular* es aquella donde la probabilidad de que una medición tomada en un intervalo con límites definidos es la misma para cualquier valor dentro de ese intervalo. Un ejemplo de estas mediciones son las especificaciones que normalmente se encuentran en los manuales de operación proporcionados por el proveedor o el fabricante de algún instrumento.

Por ejemplo, considérese que la especificación de la exactitud de un voltímetro en la escala de 20 V es ±0,02 V.

Para calcular la incertidumbre asociada a esta declaración para este voltímetro en esa escala procede de la siguiente manera:

Esta incertidumbre es de tipo B, ya que la especificación que se proporciona en el manual de operación no tiene alguna indicación adicional de cómo se obtuvo esa exactitud. En los manuales de operación u hojas de datos es usual encontrar este tipo de información. Esta especificación indica que cualquier medición hecha con ese multímetro en la escala de 20 V, podrá tomar cualquier valor con la misma probabilidad en un intervalo de ±0,02 V, con centro en la media aritmética de una serie de mediciones. Por lo anterior, se dice que esta componente de incertidumbre es del tipo B, y por las características de la información se le asocia una distribución rectangular.

Para convertirla a una incertidumbre estándar, se divide la exactitud nominal de 0,02 V entre la raíz cuadrada de 3:

$$u = \frac{0,02}{\sqrt{3}} = 0,012 \text{ (Incertidumbre estándar atribuida a la especificación de voltaje).}$$

Otro caso típico de incertidumbre tipo B al que se le asocia una distribución rectangular es el relativo a la resolución del instrumento, por ejemplo, considérese un multímetro digital cuya resolución es 0,001 V, estos multímetros se conocen como medidor de 3½ dígitos. La contribución a la incertidumbre estándar debida a la resolución de este multímetro se calcula de la siguiente manera:

El último dígito del multímetro digital variará de 0 a 1, dependiendo de la resolución del cuarto dígito invisible determinará la lectura del tercer dígito. Utilizando la corrección para la distribución rectangular, la incertidumbre asociada con la resolución del multímetro digital es:

$$u = \frac{0,0005}{\sqrt{3}} = 0,00029,$$

o se divide la resolución mínima entre la raíz cuadrada de 12

$$\frac{0,001}{\sqrt{12}} = \frac{0,001}{2\sqrt{3}} = 0,00029$$

Se debe tener mucho cuidado al utilizar esta aproximación. Si no se conoce la forma en que el instrumento redondea los dígitos, es recomendable utilizar la aproximación de manera conservadora y dividir la resolución mínima entre la raíz cuadrada de tres.

$$\frac{0,001}{\sqrt{3}} = 5,77 \times 10^{-4}.$$

Nótese que en este caso más conservador, la componente a la incertidumbre por la resolución del multímetro digital fue el doble del cálculo anterior, pero de esta manera se tiene más confianza en el resultado de la medición.

Como otro ejemplo, considérese que un fabricante indica que un bloque patrón tiene una especificación de 0,001 mm.

La varianza asociada con esta distribución rectangular es:

$$u^2 = \frac{\left(0,001\right)^2}{3} = 3,3 \times 10^{-7},$$

la desviación estándar para esta distribución rectangular es:

$$u = \sqrt{\frac{\left(0,001\right)^2}{3}} = 5,8 \times 10^{-4}$$

La *distribución triangular* es aquélla donde se observa una tendencia central en la que hay muy poca dispersión en los valores de una medición. Por ejemplo, consideremos el siguiente caso:

Se toma una serie de mediciones y se observa que la mayoría de ellas caen alrededor de un valor con una dispersión no mayor a $\pm$ 0,5 unidades de la media. La varianza asociada con la distribución triangular es:

$$u^2 = \frac{\left(0,5\right)^2}{6} = 0,042$$

La incertidumbre estándar para esta distribución triangular es

$$u = \sqrt{\frac{\left(0,5\right)^2}{6}} = 0,205$$

Otro caso donde se puede aplicar la distribución triangular para corregir y estandarizar la incertidumbre es al hacer uso de las constantes universales, por ejemplo, considérese el caso de la constante de la gravitación universal $G = 6,67428 \times 10^{-11}$ $m^3kg^{-1}s^{-2}$, cuya incertidumbre encontrada en alguna hoja de datos es $\Delta G = 0,00067 \times 10^{-11}$ $m^3kg^{-1}s^{-2}$, si no se dispone de mayor información, se puede asociar una distribución triangular y de esa manera, la varianza asociada es

$$u_2 = \frac{\left(0,00067 \times 10^{-11}\right)^2}{6} = 7,48 \times 10^{-30}$$

La incertidumbre estándar para esta distribución triangular es

$$u = \sqrt{\frac{\left(0,00067 \times 10^{-11}\right)^2}{6}} = 0,00027 \times 10^{-11}$$

La discusión sobre la evaluación tipo B de la incertidumbre estándar debe entenderse sólo como una serie de indicaciones. Adicionalmente, las evaluaciones de incertidumbre deberían basarse en datos cuantitativos tanto como sea posible.

Presupuesto de incertidumbre

El presupuesto de incertidumbre es un listado de los contribuyentes a la incertidumbre del proceso de medición, en el que se indica la contribución de cada uno de los elementos (tabla 4.3).

Tabla 4.3 Presupuesto de incertidumbre.

	Descripción de la incertidumbre	Incertidumbre	Distribución	Divisor	Incertidumbre estándar (u)	Varianza (u^2)
Incertidumbre tipo A						
1	Repetibilidad	$4{,}82 \times 10^{-5}$	Normal	1	$4{,}82 \times 10^{-5}$	$2{,}32 \times 10^{-9}$
Incertidumbre combinada tipo A					$4{,}82 \times 10^{-5}$	$2{,}32 \times 10^{-9}$
Incertidumbre tipo B						
2	Resolución 1×10^{-3}	$1{,}0 \times 100^{-3}$	Rectangular	$\sqrt{12}$	$2{,}89 \times 10^{-4}$	$8{,}33 \times 10^{-8}$
3	Exactitud (±0,01) escala de 20 V	$20{,}0 \times 100^{-3}$	Rectangular	$\sqrt{12}$	$5{,}77 \times 10^{-3}$	$3{,}33 \times 10^{-5}$
4	Estabilidad térmica (0,01 ppm/V °C)	$2{,}0 \times 100^{-7}$	Triangular	$\sqrt{6}$	$8{,}16 \times 10^{-8}$	$6{,}66 \times 10^{-15}$
5	Calibración $(1{,}8 \times 10^{-6})$ $k = 2$	$1{,}8 \times 100^{-6}$	Normal	2	$9{,}0 \times 10^{-7}$	$8{,}10 \times 10^{-13}$
Incertidumbre combinada tipo B					$5{,}78 \times 10^{-3}$	$3{,}34 \times 10^{-5}$

Nótese que antes de combinar las incertidumbres, éstas deben normalizarse a incertidumbres estándar. No se pueden combinar distribuciones rectangulares con distribuciones triangulares o distribuciones normales. La norma NMX-CH-140-IMNC-2002. *Guía para la expresión de las incertidumbres en las mediciones* proporciona los factores de corrección para distribuciones no normales:

Tabla 4.4

Distribución	Dividir entre	Divisor	1/Divisor
Rectangular	$\sqrt{12}$	3,4641	0,2887
Triangular	$\sqrt{6}$	2,4495	0,4082

Combinación de las incertidumbres

Cuando la incertidumbre estándar del resultado de una medición se obtiene de los valores de un conjunto de otras cantidades, se llama *incertidumbre estándar combinada* y se denota por u_c.

Ésta es la desviación estándar estimada asociada con el resultado y es igual a la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada obtenida a partir de todas las componentes de varianza y covarianza evaluadas de cualquier forma, utilizando la *ley de propagación de incertidumbres*.

Supóngase que todos los argumentos son independientes. El caso en el cual dos o más argumentos están relacionados, es decir, son interdependientes o correlacionados, no se discute.

La incertidumbre estándar de *y*, donde *y* es la estimación del mesurando *Y* y, por tanto, el resultado de la medición se obtiene combinando apropiadamente las incertidumbres estándar de las estimaciones de los argumentos $x_1, x_2, \ldots, x_N$. Esta incertidumbre estándar combinada de la estimación y se denota por $u_c(y)$.

La incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ es la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada $u_c^2(y)$, la cual está dada por

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 u^2(x_i) \qquad (4.10)$$

donde *f* es la función dada en la ecuación 4.1. Cada $u(x_i)$ es una incertidumbre estándar evaluada como se describió anteriormente (evaluación tipo A o evaluación tipo B). La incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ es una desviación estándar estimada que caracteriza la dispersión de los datos que pueden ser razonablemente atribuidos al mensurando *Y*.

La ecuación 04.10 está basada en una aproximación en serie de Taylor a primer orden de $Y=f(X_1, X_2, \ldots, X_N)$, expresa lo que se denomina la ley de *propagación de incertidumbres*.

Las derivadas parciales $\partial f/\partial x_i$ son iguales a $\partial f/\partial X_i$ evaluadas en $X_i = x_i$. Estas derivadas, llamadas frecuentemente *coeficientes de sensibilidad*, describen cómo la estimación y varía con los cambios de las estimaciones de los argumentos $x_1, x_2, \ldots, x_N$. En particular, el cambio en y producido por un pequeño cambio Dx_i en la estimación del argumento x_i está dado por $(\Delta y)_i = (\partial f/\partial x_i)(\Delta x_i)$. Si este cambio es generado por la incertidumbre estándar de la estimación x_i, la correspondiente variación en y es $(\partial f/\partial x_i)u(x_i)$. La varianza combinada $u_c^2(y)$ puede verse como una suma de términos, cada uno de los cuales representa la varianza estimada asociada con la estimación del mensurando y generada por la varianza estimada asociada con cada estimación x_i.

Esto sugiere escribir la ecuación 4.10 como:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left[c_i u(x_i)\right]^2 = \sum_{i=1}^{N} u_i^2(y) \qquad (4.11)$$

Donde:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}, \quad u_i(y) = |c_i| u(x_i)$$

Los coeficientes de sensibilidad $\partial f/\partial x_i$, en lugar de calcularse a partir de la función *f*, algunas veces se determinan experimentalmente: se mide el cambio en *Y* producido por un cambio en una X_i particular, manteniéndose constantes las demás. En este caso, el conocimiento de la función *f* (o una porción de ésta cuando solamente algunos coeficientes de sensibilidad son determinados de esta manera) se ve reducido a una expansión en serie de Taylor de primer orden experimental basada en los coeficientes de sensibilidad medidos.

Las componentes individuales de las incertidumbres no se suman directamente. Para combinar las componentes de las incertidumbres, se suman las varianzas, y la incertidumbre combinada se obtiene al calcular la raíz cuadrada de dicha suma. Esto es válido si se supone que las componentes de la incertidumbre son aleatorias e independientes.

Las componentes de incertidumbre tipo A se suman de la siguiente manera

$$u_{ca} = \sqrt{u_{1a}^2 + u_{2a}^2 + \ldots + y_{na}^2}$$

Las componentes de incertidumbre tipo B se suman de la siguiente manera

$$u_{cb} = \sqrt{u_{1b}^2 + u_{2b}^2 + \ldots + y_{nb}^2}$$

Al combinar las incertidumbres combinadas tipo A y tipo B por el método anterior, se obtiene la incertidumbre total combinada de la siguiente manera

$$uc = \sqrt{u_{ca}^2 + u_{cb}^2} \qquad (4.12)$$

Como ejemplo para calcular la incertidumbre combinada, consideremos el siguiente caso:

Las componentes tipo A de la incertidumbre son:

Tabla 4.5

Parámetro	Incertidumbre estándar
Repetibilidad	0,018 unidades
Reproducibilidad	0,011 unidades

por lo que la incertidumbre combinada tipo A es

$$u_{ca} = \sqrt{0,018^2 + 0,011^2} = 0,021.$$

Las componentes tipo B de la incertidumbre son:

Tabla 4.6

Parámetro	Incertidumbre estándar
Resolución	0,001 unidades
Calibración	0,0005 unidades
Exactitud	0,002 unidades

por lo que la incertidumbre combinada tipo B es

$$u_{cb} = \sqrt{0,001^2 + 0,0005^2 + 0,002^2} = 0,0023$$

Así, la incertidumbre total combinada es

$$u_c = \sqrt{0,021^2 + 0,0023^2} = 0,021$$

Asignación del factor de cobertura *k* apropiado a la incertidumbre combinada para reportar la incertidumbre expandida

Para satisfacer las necesidades de algunas aplicaciones industriales, así como los requerimientos en áreas de la salud y seguridad, se obtiene una *incertidumbre expandida U* multiplicando la incertidumbre estándar combinada u_c por un factor de cobertura k. El propósito de obtener U es proveer de un intervalo alrededor del resultado de una medición en el que puede esperarse que se incluya una fracción grande de la distribución de valores que pueden razonablemente ser atribuidos al mensurando. La elección del factor k, el cual usualmente se encuentra en el intervalo de 2 a 3, está basada en la probabilidad de cobertura o nivel de confianza requerido para el intervalo.

La incertidumbre expandida se obtiene de multiplicar la incertidumbre estándar combinada, por un factor k seleccionado de acuerdo con el nivel de confianza requerido y los grados de libertad efectivos, es decir

$$u_p(y)=ku_c(y) \tag{4.13}$$

Los grados de libertad para la incertidumbre estándar u, la cual es una combinación de varias desviaciones estándar, no se conocen en general. Esto puede ser un problema si combinase un número grande de componentes de incertidumbre con pocos grados de libertad. En este caso, los grados de libertad efectivos se determinan aproximadamente por la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$V_{ef} = \frac{u_c^4\left(y\right)}{\sum_{i=1}^{N}\frac{u_i^4\left(y_i\right)}{v_i}} \tag{4.14}$$

Donde:

V_{ef} = grados de libertad efectivos
u_c = incertidumbre combinada
u_i = incertidumbres individuales
n_i = grados de libertad asociados a cada *ui*

entonces la incertidumbre expandida se escribe como

$$u_p(y)= ku_c(y)=t_p(V_{ef})u_c(y). \tag{4.15}$$

El valor $t_p(V_{ef})$ se obtiene de la tabla 4.7, según el nivel de confianza que se requiera y el número de grados de libertad efectivos calculado.

Grados de libertad para incertidumbres tipo A

Cuando se tiene una muestra de N mediciones y se utiliza la media aritmética como parámetro de centralización, sólo hay N-1 variables linealmente independientes, por lo que para las incertidumbres tipo A, se tienen N-1 grados de libertad.

Tabla 4.7 Factores de cobertura para distintos grados de libertad y niveles de confianza.

Grados de libertad	Nivel de confianza en porcentaje					
	68,27	**90**	**95**	**95,45**	**99**	**99,73**
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

Grados de libertad para incertidumbres tipo B

Para obtener los grados de libertad en una evaluación tipo B, se proponen valores a la incertidumbre relativa $\sigma(u(x_i))/\sigma(x_i)$ que se asigna a un elemento típico de una evaluación tipo B presente en el sistema de medición, es decir:

$$v = \frac{1}{2}\left[\frac{\sigma\left(u\left(x_i\right)\right)}{\sigma\left(x_i\right)}\right]^{-2} \tag{4.16}$$

1. Grados de libertad para instrumentos de medición con indicación digital

La resolución de un instrumento de medición con indicación digital contribuye a la incertidumbre de la medición, esto es debido a que existe un intervalo de señales de entrada que producen la misma lectura en el instrumento.

Considérese que la resolución del instrumentos es δ, entonces, si la lectura es x_L, el valor del mensurando podría estar en el intervalo:

$$x_L - \frac{\delta}{2} \leq x_L \leq x_L + \frac{\delta}{2}$$

cualquier valor dentro de este intervalo es igualmente probable, por lo que como ya se dijo, se le atribuye una distribución rectangular. Con el propósito de calcular los grados de libertad a esta componente se propone que la dispersión relativa sea $\sigma(u(x_i))/\sigma(x_i) = 0{,}3$, así que sustituyéndola en la ecuación 4.15 se tiene:

$$v = \frac{1}{2}\left(0{,}3\right)^{-2} \approx 6$$

2. Grados de libertad para instrumentos de medición analógicos

Las lecturas que se realizan en un instrumento de medición analógico contribuyen al presupuesto de incertidumbre debido a que las lecturas se hacen con base en el criterio, habilidad y experiencia de quien las está tomando, con lo que se introduce un error de apreciación. Es decir, cuando se tiene un medidor analógico para la toma de lecturas, primero se ubica el valor más significativo y después se suma un valor estimado en función de la posición de la aguja indicadora entre dos marcas.

Típicamente, el observador divide el intervalo entre dos marcas y estima la fracción que ha de sumar; normalmente, la escala se divide en 2, 3 o 4 partes, según la experiencia y habilidad de quien toma las lecturas. A la incertidumbre de estas mediciones se le asigna una distribución rectangular, y los grados de libertad dependerán del número de fracciones en que se divida la escala. A mayor número de divisiones, menor nivel de confianza y menor número de grados de libertad. En la siguiente tabla, se muestran las dispersiones relativas sugeridas, en función del número de fracciones J en que se divide la distancia entre dos marcas.

Tabla 4.8

Número de fracciones	Dispersiones relativas	Grados de libertad
J	$\sigma(u(x_i))/\sigma(x_i)$	v
2	0,15	22
3	0,25	8
4	0,40	3

3. Grados de libertad para las constantes numéricas

Al utilizar constantes numéricas, la incertidumbre que se tenga sobre su exactitud debe considerarse en el presupuesto de incertidumbres. El número de grados de libertad asociados dependerá de las características de la constante, ya que si es una constante cuyo valor es el convencionalmente verdadero, asignar un número grande de grados de libertad (un valor muy confiable), por ejemplo $v = 200$. Pero si no se tiene mucha información al tratarse de una constante experimentalmente determinada, entonces se deberá asignar una dispersión relativa $\sigma(u(x_i))/\sigma(x_i) = 0{,}5$, con lo que los grados de libertad serían $v = 2$.

4. Grados de libertad para los informes de calibración

Se considera que la dispersión relativa asignada a un informe de calibración debe ser pequeña, pues cuando se calibra un instrumento de medición, se puede tener un nivel de confianza muy alto y asignar un gran número de grados de libertad, entonces se propone que a los informes de calibración se les asigne una dispersión relativa $\sigma(u(x_i))/\sigma(x_i) = 0{,}05$ con lo que los grados de libertad serían $v = 200$.

5. Grados de libertad para la exactitud del instrumento lector

Esta información es proporcionada por el fabricante a través del manual de operación o de las hojas de especificaciones del instrumento. Sin embargo, usualmente los fabricantes no dan informes detallados de las condiciones en que determinaron la tolerancias y exactitud del instrumento en sus diversas escalas. Por razones comerciales, los fabricantes suelen sobreestimar las capacidades de los instrumentos, por lo que la información proporcionada no es tan confiable y se debe asignar una dispersión relativa alta: $\sigma(u(x_i))/\sigma(x_i) = 0{,}25$ con lo que los grados de libertad serían $v = 8$.

Con base en los criterios anteriormente detallados, se pueden asignar los grados de libertad a cada una de las componentes tipo B de la incertidumbre, por ejemplo, tomemos los datos del caso mencionado en "Combinar las incertidumbres". Consideremos que se hicieron tres series de mediciones cambiando alguna de las condiciones de medición (reproducibilidad), y cada serie consistió en cinco mediciones (repetibilidad) y se tomaron las mediciones con un instrumento de medición con indicación digital, por tanto, en la siguiente tabla se muestran los grados de libertad para incertidumbres tipo A y B.

Tabla 4.9

Parámetro	Incertidumbre estándar	Tipo	Dispersión relativa $\sigma(u(x_i))/\sigma(x_i)$	Grados de libertad v
Repetibilidad	0,018 unidades	A	-	4
Reproducibilidad	0,011 unidades	A	-	2
Resolución	0,001 unidades	B	0,6	3
Calibración	0,0005 unidades	B	0,05	200
Exactitud	0,002 unidades	B	0,25	8

La incertidumbre combinada es $u_c = 0{,}021$, por ello, los grados efectivos de libertad se calculan utilizando la ecuación 4.14:

$$v_{ef} = \frac{0{,}021^4}{\frac{0{,}018^4}{4} + \frac{0{,}011^4}{2} + \frac{0{,}001^4}{3} + \frac{0{,}0005^4}{200} + \frac{0{,}002^4}{8}} \approx 6$$

Por tanto, tenemos que de la tabla 4.4, el valor de $t_p(V_{ef}) = tp(6) = 2{,}45$ es el valor que asegura un nivel de confianza de 95%, el cual es el nivel recomendado por la NMX-CH-140-IMNC-2002 *Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones*, de tal manera que según la ecuación 4.15, la incertidumbre expandida u_p será:

$$u_p = ku_c = 2{,}45 \times 0{,}021 = 0{,}052$$

Documentación de un reporte de incertidumbre con la información apropiada

Todos los resultados de la estimación de la incertidumbre en las mediciones se deben documentar en un reporte de incertidumbre en la medición. Es importante asegurar que este documento contiene los cálculos y razonamientos utilizados para llevar a cabo las mediciones. El reporte de incertidumbre debe estar bien documentado y contener los comentarios necesarios, de tal manera que el razonamiento y el análisis de incertidumbres sean suficientemente claros para quien lo lea.

RESUMEN

En este capítulo hicimos hincapié en la importancia de estimar la incertidumbre en el proceso de medición. Discutimos el concepto de incertidumbre de la medición, clasificamos los tipos de incertidumbre en función a los métodos de evaluación empleados, tipo A o tipo B, y describimos el proceso para calcular por varios métodos las incertidumbres individuales.

Definimos los conceptos requeridos para generar el reporte de incertidumbres, como son: incertidumbre estándar, incertidumbre expandida y el factor de cobertura *k*.

Finalmente, hicimos énfasis en la importancia de documentar con todos los datos necesarios el reporte de incertidumbres de manera clara para garantizar la confiabilidad en la medición.

BIBLIOGRAFÍA

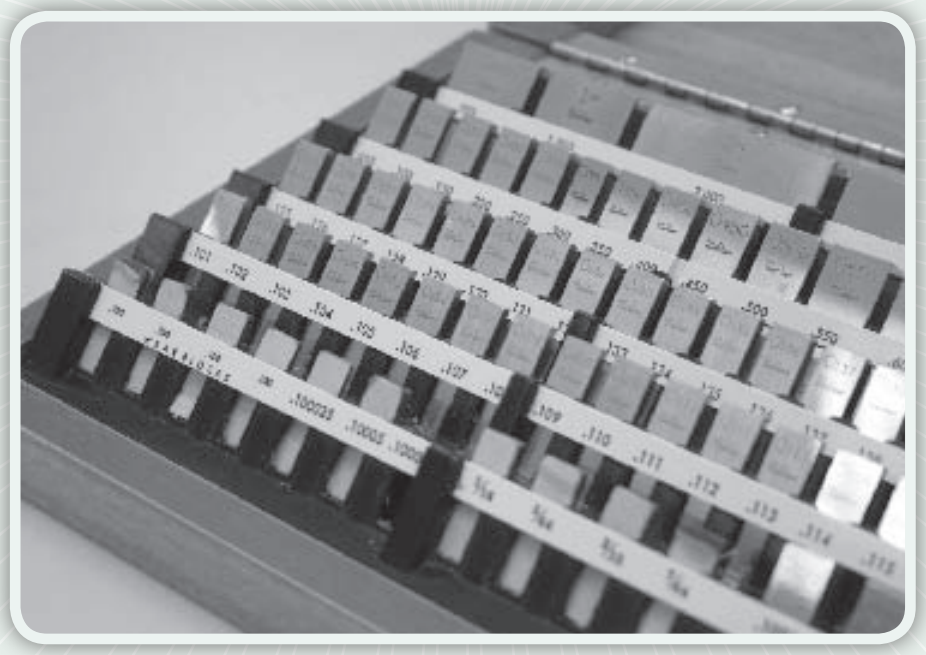
NMX-CH-140-IMNC: 2002. Guía para la expresión de incertidumbres en las mediciones.

BIPM-ISO: 1986. Guía para la expresión de las incertidumbres en las mediciones.

CAPÍTULO

5

Bloques patrón



Introducción
Bloques patrón
Propiedades físicas y térmicas de los bloques patrón
Aplicaciones de los bloques patrón
Resumen
Bibliografía

Introducción

Los bloques patrón fueron inventados en 1896, y desde entonces su calibración ha sido la más antigua de entre las calibraciones de alta precisión que se han realizado en metrología dimensional. La invención de los bloques patrón ha sido la mayor fuente de estandarización de longitud para la industria. Se esperaría que mediciones de tanta importancia fueran cada vez más exactas y sofisticadas después de 80 años de desarrollo. Sin embargo, debido a la relativa simplicidad de los bloques patrón, esto ha sido cierto sólo en parte. Las mediciones más exactas con bloques patrón no han cambiado de manera notoria en exactitud en los últimos 70 años. Lo que ha aumentado es la necesidad creciente de mediciones cada vez más exactas; lo que antes sólo se podía hacer con el equipamiento y la experiencia en los laboratorios nacionales primarios, ahora se realiza de manera rutinaria en los laboratorios industriales privados. Para satisfacer esta amplia necesidad de mayor exactitud, se han mejorado continuamente los métodos de calibración para los bloques patrón.

Al inicio del siglo XIX había dos sistemas de medición de longitudes. La unidad de longitud métrica fue el metro, que se definió originalmente como 1 / 10 000 000 del arco formado desde el polo hasta el ecuador, y que pasaba por París. Los datos que se tomaron en una medición muy precisa de una parte de ese arco se utilizaron para definir una barra de 1 m, artefacto que se convirtió en la definición práctica y legal del metro. El sistema de unidades inglés estaba basado en una barra de una yarda, otro artefacto estándar.

Esos artefactos estándar se utilizaron durante aproximadamente 150 años. El problema con un artefacto estándar es que casi todos los materiales son ligeramente inestables y cambian su longitud con el tiempo. Por ejemplo, en mediciones repetidas se encontró que la yarda británica estándar era ligeramente inestable. La consecuencia de esta inestabilidad fue que la pulgada británica (1 / 36 yarda) se contrajo a lo largo de los años, como se muestra en la tabla 5.1.

Tabla 5.1

Año	Longitud [mm]
1895	25,399978
1922	25,399956
1932	25,399950
1947	25,399931

El primer paso para reemplazar la barra patrón de 1 m lo dio Albert Michelson, a petición del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). En 1892, Michelson midió el metro en términos de la longitud de onda de la luz roja emitida por el cadmio. Se escogió esta longitud de onda debido a su alta coherencia, es decir, se pueden observar franjas de interferencia a una distancia bastante grande. A pesar del trabajo de Michelson, el artefacto estándar se mantuvo hasta 1960, cuando el metro se redefinió en términos de la longitud de onda de la luz; específicamente se utilizó la luz rojo-naranja emitida por el gas excitado de kryptón 86.

Aun cuando esta definición fue aceptada, los láseres de helio-neón, recién inventados, se empezaron a utilizar en las técnicas de interferometría. En la década de los setenta, se empezaron a considerar varios láseres estabilizados como fuentes de luz mucho mejores que la línea rojo-naranja del kryptón 86 para la definición del metro. Ya que había un número considerable de candidatos calificados, el CIPM decidió no utilizar alguna longitud de onda en particular, sino que hizo un cambio en la jerarquía de la medición. La solución fue definir la velocidad de la luz en el vacío como 299 792 458 m/s exactamente, y hacer la longitud una unidad derivada. En teoría, cualquiera puede reproducir el metro con un reloj exacto.

En la práctica, el método de tiempo de vuelo es muy sofisticado para la mayoría de las mediciones, y el metro se mide usando longitudes de onda de la luz conocidas. El CIPM emitió una lista de fuentes láser y atómicas, así como frecuencias recomendadas para la luz. Dada la definición de la velocidad de la luz, es posible calcular la longitud de onda de la luz; también se puede reproducir 1 m contando las longitudes de onda de la luz.

En 1866, el gobierno federal de Estados Unidos de América decidió basar todas las mediciones geodésicas en una pulgada establecida a partir del metro internacional. Esta pulgada se definió de tal manera que hubiera exactamente 39,37 in en el metro. Inglaterra continuó utilizando la yarda patrón para definir la pulgada. Esas pulgadas diferentes coexistieron durante casi 100 años, hasta que los problemas de control de calidad durante la Segunda Guerra Mundial demostraron que las pulgadas utilizadas eran muy diferentes para que hubiera un intercambio de partes entre los países de habla inglesa. En la década de los cincuenta se llevaron a cabo varios congresos, y en 1959 los directores de los laboratorios nacionales de metrología de Estados Unidos de América, Canadá, Inglaterra, Australia y Sudáfrica acordaron definir la pulgada como 25,4 mm exactamente. Esta definición fue un compromiso; la pulgada inglesa resultó un poco más larga y la norteamericana, más corta. La vieja pulgada norteamericana sigue en uso para actividades comerciales de agrimensura de la tierra en la forma de "*pie del agrimensor*", que equivale a 12 viejas pulgadas norteamericanas.

En este capítulo se hace una descripción de la teoría y uso de los bloques patrón.

Bloques patrón

Historia breve de los bloques patrón

Al final del siglo XIX la idea propuesta por Eli Whitney de intercambiar partes ya había sido aceptada por las naciones industrializadas como el modelo de fabricación industrial. Uno de los inconvenientes de este nuevo sistema era que para mantener un adecuado control de calidad se requería un gran número de bloques patrón para verificar las partes y llevar a cabo la calibración de los instrumentos de medición. El número de bloques necesarios para productos complejos, y el esfuerzo requerido para fabricar y mantener los bloques, representaba un costo significativo. El paso más importante hacia la simplificación de esta situación lo dio un maquinista sueco: C. E. Johannson.

La idea de Johannson, que fue formulada en 1896, consistía en que un pequeño número de bloques podría combinarse para formar bloques compuestos, con lo que se reduciría el número de bloques requeridos en el almacén. Por ejemplo, si se dispone de cuatro bloques

de 1 mm, 2 mm, 4 mm y 8 mm, podrían combinarse de cualquier manera; todas las medidas desde 1 hasta 15 mm se pueden reproducir con sólo esos cuatro bloques. Johannson encontró que si dos de las caras opuestas de una pieza de acero se pulieran muy planas y paralelas, se podrían unir dos bloques cuando sus superficies se deslizaran con una pequeña cantidad de grasa entre ellas. El espesor de esta "preocupante" capa es de aproximadamente 25 nm, y resulta ser tan pequeña en relación con las tolerancias permitidas, que los bloques se pueden adherir sin necesidad de realizar ninguna corrección debida al espesor de la interface. Finalmente, el espesor de la película se definió como parte de la longitud del bloque, con esto se puede utilizar un número ilimitado de bloques sin tener que hacer correcciones debido al tamaño de las interfaces.

En los Estados Unidos de América, Henry Ford adoptó la idea con gran entusiasmo, y gracias a su ejemplo, el uso de los bloques patrón se instituyó como el estándar primario de transferencia de longitud en la industria. Al iniciar la Primera Guerra Mundial, los bloques patrón eran tan importantes para la industria que el gobierno federal ya había realizado acciones para asegurar la disponibilidad de los bloques, pues éstos provenían de Europa y con el estallido de la guerra, el suministro se había suspendido.

En 1917, el inventor William Hoke propuso al Laboratorio Nacional de Metrología de Estados Unidos de América (NBS) un método para la fabricación de bloques primarios equivalentes a los de Johannson. Obtuvieron fondos del gobierno federal para el proyecto y se produjeron 50 conjuntos de 81 bloques cada uno, fabricados en el NBS. Esos bloques eran cilíndricos y tenían un agujero en el centro, este agujero era el rasgo más prominente de su diseño. La generación actual de bloque patrón de sección cuadrada tienen ese agujero y se conocen como "bloques de Hoke".

Bloques patrón estándar

Existen dos estándares principales en los Estados Unidos de América, la Especificación Federal GGG-G-15C y la American National Standard ANSI/ASME B89.1.9M. Hay varias diferencias entre ambos estándares, la más importante se refiere a la organización del material y el listado de los conjuntos de estándares de bloques dados en la especificación GGG-G-15C. El material en la especificación ASME es más pertinente para la calibración.

El estándar ASME define las propiedades físicas relevantes de los bloques patrón hasta 20 in y 500 mm de longitud. Las propiedades incluyen la geometría del bloque (longitud, paralelismo, planicidad y acabado de la superficie), longitudes nominales estándar y un sistema de tolerancias para clasificar el nivel de exactitud de los bloques y conjuntos de bloques.

El sistema de tolerancias fue inventado como una forma de simplificar el uso de los bloques. Por ejemplo, supongamos que los bloques patrón se utilizan para calibrar un cierto bloque de tamaño fijo, y la exactitud requerida del bloque es de 0,5 μm. Si el tamaño del bloque requiere una pila de cinco bloques para obtener el tamaño nominal del bloque, la exactitud de cada bloque debe ser de 0,5/5 o 0,1 μm. Este valor es cercano a la exactitud promedio de un bloque patrón de calibración industrial, y la tolerancia debe mantenerse con cualquier longitud de los bloques patrón si las longitudes calibradas se utilizaron para calcular la longitud de la pila. Supongamos que tenemos un conjunto de bloques patrón de los cuales estamos seguros

de que la longitud de cada bloque no difiere en más de 0,05 μm de su longitud nominal. Con esta información podemos utilizar los bloques, suponer las longitudes nominales y la medición será lo suficientemente precisa.

En el capítulo 3 se definieron las tolerancias, pero es importante reconocer la diferencia entre calibración y certificación de bloques patrón. Cuando se calibra un conjunto de bloques patrón, se registra en el informe de calibración la longitud medida de cada uno de los bloques. El reporte no establece qué tolerancia satisface el bloque. En la mayoría de las calibraciones industriales sólo se reporta la tolerancia certificada, ya que las correcciones no se utilizan.

Nomenclatura y definiciones

Un bloque patrón es una longitud estándar que tiene superficies opuestas planas y paralelas. La forma de la sección transversal no es muy importante, aun cuando los estándares sugieren dimensiones para secciones transversales rectangulares, cuadradas y circulares. Los bloques patrón tienen longitudes nominales definidas en el sistema métrico (milímetros) o en el sistema inglés (pulgadas) (1 in = 25,4 mm).

La longitud de los bloques patrón se define a condiciones de referencia estandarizadas:

Temperatura = 20 °C (68 °F).

Presión barométrica = 101,325 Pa (1 atmósfera).

Presión de vapor de agua = 1,333 Pa (10 mm de mercurio).

Contenido de CO_2 en el aire = 0,03%.

De esas condiciones, sólo la temperatura tiene un efecto medible en la longitud física del bloque. Las otras condiciones son necesarias debido a que la medición de la longitud del bloque patrón se hace por comparación con la longitud de onda de la luz. Para fuentes de luz estándar la frecuencia de la luz es constante, pero la longitud de onda depende de la temperatura, la presión, la humedad y el contenido de CO_2 en el aire.

La longitud del bloque patrón se define como la distancia perpendicular desde un punto en el bloque en uno de sus extremos a un plano real auxiliar en el otro extremo del bloque, como se muestra en la figura 5.1.

Esta longitud se mide interferométricamente y se corrige a condiciones estándar. Hay que destacar que los bloques nunca se miden en condiciones estándar porque los valores estándar de la presión de vapor del agua de 10 mm de mercurio corresponden de manera aproximada a 60% de la humedad relativa que se debe permitir para que el acero se oxide. Las condiciones estándar son en realidad condiciones espectroscópicas estándar; es decir, las condiciones a las cuales los espectroscopistas definen las longitudes de onda de la luz.

Esta definición de longitud de un bloque patrón que utiliza un plano auxiliar podría parecer extraña, pero es muy importante por dos razones: primero, la luz penetra ligeramente en la superficie del bloque patrón como resultado de la interacción de la radiación electromagnética con los metales. Si el plano y el bloque patrón están hechos del mismo material y tienen el mismo acabado en la superficie, entonces la luz penetrará de la misma forma en la superficie del bloque y en la superficie del plano de referencia, y los errores se compensan. Pero si la longitud del bloque se define como la distancia entre la del bloque patrón, entonces los errores

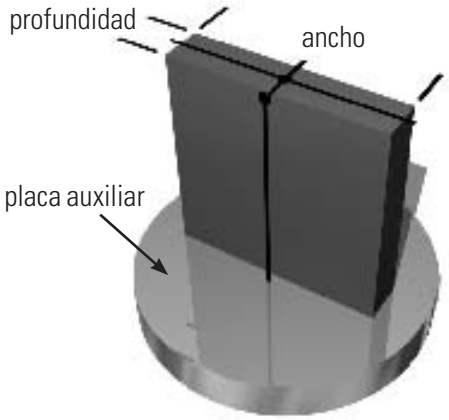


Figura 5.1 *La longitud de un bloque patrón es la distancia desde el punto de medición en la superficie superior del bloque al plano de la placa auxiliar adherida al bloque.*

debidos a la penetración de la luz se suman, no se cancelan, eso nos obligaría a medir la longitud de penetración de la luz para poder efectuar la corrección. Esas mediciones extra podrían, naturalmente, reducir la exactitud de la calibración.

La segunda razón es que en condiciones de uso los bloques patrón se unen. Supóngase que la longitud de los bloques se definió como la distancia entre los dos extremos del bloque, no respecto al plano auxiliar. Por ejemplo, si necesitamos un bloque de 6,523 mm, tendremos que unir bloques de longitudes 2,003 mm, 2,4 mm y 2,12 mm. La longitud de esta pila es de 6,523 mm más la longitud de dos interfaces. Esta pila pudo haberse formado utilizando el conjunto [1 mm, 1 mm, 1 mm, 1,003 mm, 1,4 mm, 1,12 mm] el cual tendría la longitud de 6,523 mm más la longitud de 5 interfaces. Para poder utilizar ese bloque, debemos conocer la longitud de esas interfaces. Pero si la longitud de cada bloque contiene la longitud de una interface, entonces ambas pilas tendrán la misma longitud definida.

Los bloques patrón de referencia se calibran por interferometría de acuerdo con la definición de longitud de un bloque patrón. Cada bloque maestro contiene su propia interface, la cual es transferida a cada bloque que se calibra por técnicas de comparación mecánica.

La longitud mecánica de un bloque es la longitud determinada por comparación mecánica de un bloque con otro bloque de longitud interferométricamente determinada. La comparación mecánica debe hacerse usando dos puntos designados, uno en cada extremo del bloque. Considerando que la mayoría de los comparadores usan contacto mecánico para la comparación, si los bloques no son del mismo material deben hacerse correcciones debidas a la deformación de los bloques originadas por la fuerza de contacto en el comparador.

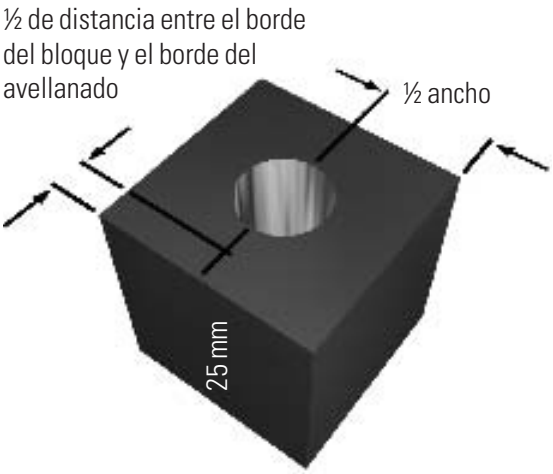


Figura 5.2 *Definición de los puntos de medición en un bloque patrón cuadrado.*

Los puntos de referencia para bloques rectangulares son los puntos centrales de cada cara. Para bloques de sección cuadrada la comparación mecánica se muestra en la figura 5.2.

Para bloques rectangulares y circulares, el punto de referencia se ubica en el centro de las caras. Para bloques cuadrados y circulares que tienen un hueco central, el punto se loca-

liza a la mitad de la distancia entre el borde del hueco y el borde del bloque más cercano a la marca del tamaño del mismo.

Grados de tolerancia

Hay cuatro grados de tolerancia: 0,5, 1, 2 y 3. Bloques patrón de grados 0,5 y 1 tienen valores muy cercanos a su valor nominal. En general, se usan esos bloques como bloques maestro para calibración. Los bloques de grado 2 y 3 son de menor calidad y se utilizan para mediciones. Las tablas 5.2a y 5.2b indican los requisitos de longitud, planicidad y paralelismo para cada grado. La tabla 5.2a muestra que los bloques de grado 0,5 están dentro de una millonésima de pulgada (1 µin), con grados 1, 2 y 3; cada uno duplica aproximadamente el tamaño máximo de la desviación permitida.

Tabla 5.2a Grados de tolerancia para bloques en pulgadas (en µin).

Nominal	Grado 0,5	Grado 1	Grado 2	Grado 3
< 1 in	1	2	+4, –2	+8, –4
2	2	4	+8, –4	+16, –8
3	3	5	+10, –5	+20, –10
4	4	6	+12, –6	+24, –12
5		7	+14, –7	+28, –24
6		8	+16, –8	+32, –16
7		9	+18, –9	+36, –18
8		10	+20, –10	+40, –20
10		12	+24, –12	+48, –24
12		14	+28, –14	+56, –28
16		18	+36, –18	+72, –36
20		20	+40, –20	+80, –40

Tabla 5.2b Grados de tolerancia para bloques métricos (µm).

Nominal	Grado 0,5	Grado 1	Grado 2	Grado 3
< 10 mm	0,03	0,05	+0,10, –0,05	+0,20, –0,10
< 25 mm	0,03	0,05	+0,10, –0,05	+0,30, –0,15
< 50 mm	0,05	0,10	+0,20, –0,10	+0,40, –0,20
< 75 mm	0,08	0,13	+0,25, –0,13	+0,45, –0,23
< 100 mm	0,010	0,15	+0,30, –0,15	+0,60, –0,30
125 mm		0,18	+0,36, –0,18	+0,70, –0,35
150 mm		0,20	+0,41, –0,20	+0,80, –0,40
175 mm		0,23	+0,46, –0,23	+0,90, –0,45
200 mm		0,25	+0,51, –0,25	+1,00, –0,50

Continúa

Continuación

250 mm		0,30	+0,60, –0,30	+1,20, –0,60
300 mm		0,35	+0,70, –0,35	+1,40, –0,70
400 mm		0,45	+0,90, –0,45	+1,80, –0,90
500 mm		0,50	+1,00, –0,50	+2,00, –1,90

Ya que hay una incertidumbre asociada a cualquier medición, el estándar permite una tolerancia adicional para longitud, planicidad y paralelismo. Esas tolerancias adicionales están dadas en la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Desviaciones adicionales para estimación de la incertidumbre.

Nominal in (mm)	Grado 0,5 µin (µm)	Grado 1 µin (µm)	Grado 2 µin (µm)	Grado 3 µin (µm)
<4 (100)	1 (0,03)	2 (0,05)	3 (0,08)	4 (0,10)
<8 (200)		3 (0,08)	6 (0,15)	8 (0,20)
<12 (300)		4 (0,10)	8 (0,20)	10 (0,25)
<20 (500)		5 (0,13)	10 (0,25)	12 (0,30)

Por ejemplo, para un bloque de grado 1 de longitud nominal 1 in, la tolerancia en la longitud es de 2 µin. Con la tolerancia adicional para la estimación de la incertidumbre, de la tabla 5.3 de 2 µin, un bloque de grado 1 debe tener su longitud medida dentro de 4 µin de su valor nominal.

Requisitos de recalibración

No hay un calendario establecido para la recalibración de bloques patrón; sin embargo, los estándares ASME y el federal recomiendan periodos de recalibración para cada grado de tolerancia de acuerdo con la tabla 5.4:

Tabla 5.4

Grado	Periodo de recalibración
0,5	Cada año
1	Cada año
2	Cada mes o hasta seis meses
3	Cada mes o hasta seis meses

Si los bloques de referencia no se utilizan de manera intensiva, y se usan en un ambiente seco, este calendario podría ser adecuado, pero lo más apropiado es contar con un sistema de aseguramiento de mediciones confiable que permita definir los mejores periodos de calibración en función del modo en que se utilizan los bloques.

Estándares internacionales

Los bloques patrón se definen internacionalmente por el estándar ISO 3650, cuya primera edición se publicó en 1978. Este estándar es similar al ANSI en su esencia, pero difiere en algunos detalles y, por supuesto, no define la dimensión de bloques en el sistema inglés.

La longitud de los bloques se define como la distancia entre una superficie plana en contacto con una cara del bloque, y un punto en el extremo opuesto. El estándar ISO sólo define bloques de sección transversal rectangular y los puntos de medición se encuentran en el centro de las caras del bloque.

El estándar ISO 3650 define cuatro grados de tolerancia: 00, 0, 1 y 2. El algoritmo para las tolerancias en longitud se muestra en la tabla 5.5, y en el estándar se incluyen regla de redondeo para calcular las tablas que incluye. L es la longitud nominal del bloque en milímetros.

Tabla 5.5 Algoritmo para los cuatro grados de tolerancia ISO 3650.

Grado	Desviación de la longitud nominal [μm]
00	(0,05 + 0,0001L)
0	(0,10 + 0,0002L)
1	(0,20 + 0,0004L)
2	(0,40 + 0,0008L)

El estándar ISO no comprende tolerancias adicionales para la estimación de la incertidumbre; sin embargo, las tolerancias ISO son comparables a las de la especificación ANSI cuando se suma la tolerancia para estimación de la incertidumbre en las tolerancias de las tablas 5.2a y 5.2b. La diferencia práctica entre esas especificaciones es mínima.

Propiedades físicas y térmicas de los bloques patrón

Materiales

Desde que se inventaron, los bloques patrón siempre se han fabricado con acero. El proceso de pulido utilizado para el acabado de los extremos, y los usos comunes de los bloques requieren una superficie dura. Una virtud adicional del acero es que una gran cantidad de productos industriales se fabrican con acero. Si el bloque patrón tiene el mismo coeficiente de expansión térmica que la parte que se compara, entonces no se requiere considerar la temperatura para obtener mediciones exactas. Esto último se discutirá más adelante.

El principal problema de los bloques patrón ha sido siempre la estabilidad del material. Debido a los procesos de endurecimiento y a la estructura cristalina del acero que se utiliza, la longitud de la mayoría de los bloques patrón cambia con el tiempo. Para bloques largos, de algunas pulgadas, la estabilidad fue su mayor limitación. En las décadas de los cincuenta y los sesenta, ASTM y el NBS de los Estados Unidos de América financiaron un programa para analizar el problema de la estabilidad. Se estudió un gran número de tipos de acero y de procesos de endurecimiento para obtener un método de fabricación que produjera bloques estables.

Esto dio como resultado el uso general del acero endurecido 52100. Los cambios en longitud son menores que una parte en 10^{-6}/década.

Se ha utilizado otro tipo de materiales para la fabricación de bloques. De éstos, el carburo de tungsteno, el carburo de cromo y el Cervit son los casos de más interés.

Los bloques de carburo son muy duros y no se rayan fácilmente, el acabado de las superficies es tan bueno como en el acero, y las longitudes resultan ser incluso más estables que en el acero. El carburo de tungsteno tiene un coeficiente de expansión térmica muy pequeño (1/3 del acero), pero a causa de su alta densidad los bloques resultan ser muy pesados. El carburo de cromo tiene un coeficiente de expansión térmica intermedio (2/3 del acero), y su densidad es aproximadamente la misma que el acero. Los bloques de carburo de cromo se han vuelto muy populares como bloques patrón de referencia debido a su durabilidad y a que en un laboratorio con ambiente controlado la diferencia del coeficiente de expansión térmica entre el carburo y el acero se puede manejar fácilmente.

El Cervit es un cerámico vítreo diseñado con un coeficiente de expansión térmica casi cero. Esta propiedad, más un corrimiento de fase cero en bloques de cuarzo, hacen el material atractivo para uso como bloque patrón de referencia. Los inconvenientes son que el material es más suave que el acero, lo que hace de las rayaduras un peligro, y por su naturaleza cerámica es quebradizo. Los bloques de Cervit tienden a fracturarse. Debido a su coeficiente de expansión térmica cero no siempre es útil, y por la combinación de suavidad y fragilidad nunca se generalizó su uso y dejaron de fabricarse.

En la actualidad, algunas compañías fabrican bloques cerámicos con base en la zirconia. Esos bloques son muy duros y tienen coeficientes de expansión térmica de aproximadamente $9 \times 10^{-6}/°C$, 20% menor que el acero.

Expansión térmica

En la mayoría de los materiales, los cambios en la temperatura provocan modificaciones en sus dimensiones. Este cambio depende tanto del gradiente de temperatura como de la temperatura a la cual ocurre el cambio. La ecuación que describe este efecto es:

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha_L \Delta T \qquad (5.1)$$

Donde L es la longitud, ΔL es el cambio en la longitud del objeto, ΔT es el gradiente de temperatura y α_L es el coeficiente de expansión térmica.

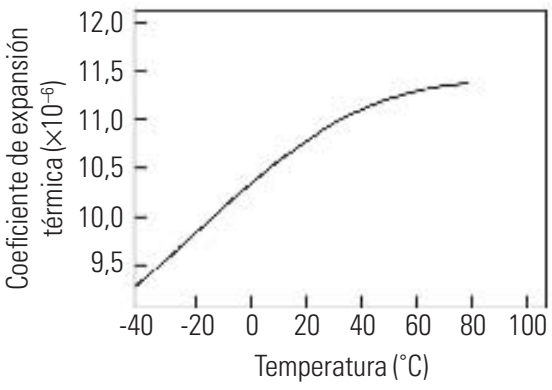


Figura 5.3 *Variación con la temperatura del coeficiente de expansión térmica de un bloque patrón de acero.*

Expansión térmica de materiales de bloques patrón

En el caso más simple, donde ΔT es pequeño, α_L puede considerarse como constante. En realidad, α_L depende de la temperatura

absoluta del material. La figura 5.3 muestra el coeficiente de expansión térmica del bloque de acero. Este diagrama es típico de la mayoría de los metales, el coeficiente de expansión térmica crece con la temperatura.

Como ejemplo numérico, un bloque de acero tiene un coeficiente de expansión térmica de $11{,}5 \times 10^{-6}/°C$. Esto significa que un bloque de 100 mm aumentará su longitud 1,15 μm cuando su temperatura aumente 1 °C. Esto es un cambio significativo en su longitud, ya que se espera que incluso los bloques de clase 3 se mantengan dentro de 0,2 μm de su valor nominal. Para estándares grandes, los efectos de temperatura pueden ser notables, para producir un cambio de 0,25 μm en un bloque de 500 mm, sólo se requiere un cambio en la temperatura de 0,043 °C.

A pesar de que el acero tiene un coeficiente de expansión térmica grande, siempre ha sido el material de elección para la fabricación de bloques patrón. La razón es que casi todas las máquinas de producción están hechas de acero, y los efectos térmicos tienden a cancelarse.

Para ilustrar esta aseveración, supóngase que deseamos fabricar un cubo de 100 mm de arista. La primera pregunta que debemos responder es a cuál temperatura la longitud es de 100 mm. Como hemos afirmado, la dimensión de la mayoría de los objetos depende de su temperatura, y entonces una dimensión sin una temperatura asociada no tiene significado. Para mediciones dimensionales, la temperatura estándar es de 20 °C. Si solicitamos un cubo de 100 mm de arista, lo que necesitamos es un cubo cuyas aristas midan 100 mm a una temperatura de 20 °C.

Supongamos que la temperatura de fabricación fue de 25 °C y que tenemos un bloque patrón perfecto con coeficiente de expansión térmica cero. Si fabricamos el cubo de tal manera que cada lado tenga exactamente la misma longitud que el bloque, ¿qué longitud tiene? Cuando el cubo se mida en el laboratorio de metrología a una temperatura de 20 °C, se contraerá $11{,}5 \times 10^{-6}/°C$, lo cual para el bloque del laboratorio es 5,75 μm, es decir, el cubo será más pequeño por 5,75 μm.

Supongamos ahora que se utiliza un bloque de acero. Al llevar el bloque a la fábrica, éste debe haberse alargado 5,75 μm. Cuando se fabrique el cubo con la misma dimensión del bloque patrón, estará sobredimensionado por 5,75 μm. Y, finalmente, cuando el bloque y el cubo se transporten al laboratorio de metrología, ambos se habrán contraído por la misma cantidad de 5,75 μm, y el cubo tendrá la misma longitud establecida en la especificación.

Es relevante destacar que la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica entre la pieza de trabajo y el bloque patrón es el parámetro importante. Idealmente, cuando se fabrican piezas de latón y aluminio, se deberían utilizar bloques patrón de latón o aluminio. Pero esto no resulta práctico por varias razones, una de ellas es que no es conveniente fabricar bloques de materiales suaves, ya que una vez fabricados, sus superficies podrían dañarse tan fácilmente que su vida de utilidad sería de tan solo unos cuantos días. Otra razón es que la mayoría de las piezas maquinadas son de acero. Esto era estrictamente cierto hasta la mitad del siglo pasado, cuando las tecnologías del plástico y el aluminio todavía no estaban desarrolladas.

Finalmente, los bloques patrón de acero pueden usarse para medir cualquier material si se hacen las correcciones provenientes de la diferencia de coeficientes de expansión térmica de los dos materiales involucrados. Si para medir una pieza de aluminio de 100 mm a 25 °C se utiliza un bloque patrón de acero, se debe utilizar el factor de corrección. El coeficiente de ex-

pansión térmica del aluminio es casi el doble del coeficiente de expansión térmica del acero, al llevar la pieza al laboratorio de metrología a 20 °C, se contraerá el doble que el bloque patrón. Entonces la pieza de aluminio deberá fabricarse sobredimensionada por la cantidad:

$$\Delta L = (\alpha_L{}^{\text{aluminio}} - \alpha_L{}^{\text{acero}}) \times L \times \Delta T \qquad (5.2)$$

$$= (24 - 11{,}5) \times 10^{-6}/\,^{\circ}\text{C} \times 100\ \text{mm} \times 5\ ^{\circ}\text{C}$$

$$= 6{,}25\ \mu\text{m}$$

Así que si se fabrica el cubo 6,25 μm más largo que el bloque de acero, ambos medirán exactamente 100 mm cuando sean llevados a las condiciones estándar (20 °C).

Hay algunas mezclas de materiales, aleaciones tales como invar y mezclas cristalinas/vítreas como Zerodur, cuyos coeficientes de expansión térmica son pequeños. Esos materiales son la combinación de dos componentes, uno de éstos se expande con el aumento de la temperatura, y otro se contrae con el aumento de la temperatura. La mezcla se prepara para que la expansión de uno de los componentes coincida con la contracción del otro. En realidad, los materiales no tienen exactamente las dependencias opuestas en la temperatura, el ajuste de la expansión y la contracción sólo se puede lograr exactamente a una temperatura dada, usualmente 20 °C, y los coeficientes de expansión térmica pueden ser muy diferentes a tan solo unos cuantos grados de diferencia. Ejemplos de tales materiales son el super-invar, Zerodur y Cervit, que se muestran en la figura 5.4.

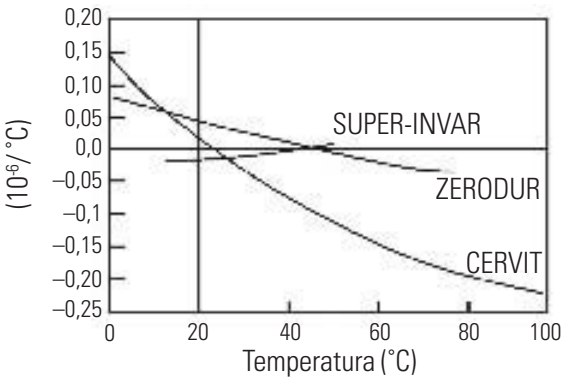


Figura 5.4 *Variación con la temperatura para materiales con coeficientes de expansión térmica pequeños.*

Los coeficientes de expansión térmica a 20 °C que se utilizan comúnmente en materiales en metrología dimensional se muestran en la tabla 5.6.

Tabla 5.6

Material	Coeficiente de expansión térmica (× 10^{-6}/°C)
Aluminio	24
Latón libre de cortes	20,5
Bloque patrón de acero (< 25 mm)	11,5
Bloque patrón de acero (500 mm)	10,6
Bloque patrón cerámico (circonio)	9,2
Carburo de cromo	8,4
Granito	6,3

Continúa

Continuación

Carburo de tungsteno	4,5
Invar	1,2
Zerodur	0,05

Para tener una idea intuitiva de esos números, la figura 5.5 muestra una gráfica de barras de los cambios relativos en longitud de piezas de 100 mm de varios materiales cuando la temperatura varía de 20 a 25 °C.

Incertidumbre por expansión térmica

Hay dos fuentes que contribuyen a la incertidumbre en las mediciones debidas a la expansión térmica de los bloques. En la ecuación 5.1, podemos observar que la longitud del bloque depende de nuestro conocimiento de la temperatura y del coeficiente de expansión térmica del bloque. Para la mayoría de los sistemas de medición se conoce la incertidumbre asociada a las mediciones de temperatura, ya sea por las especificaciones del fabricante o por los informes de calibración de los termómetros. Para sistemas simples basados en la medición de temperatura con termopares industriales o termistores, la incertidumbre es de unas décimas de grado. Para mediciones de nivel submicrométrico esta instrumentación es insuficiente y se requiere de termometría más sofisticada.

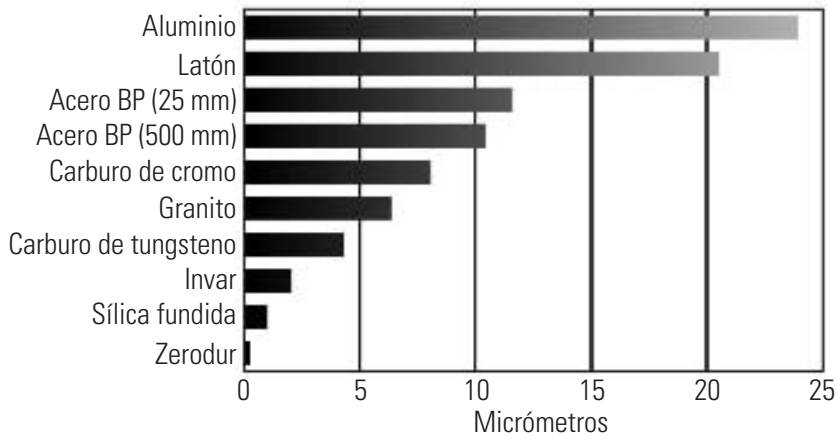


Figura 5.5 *Expansión térmica de bloques de 100 mm de varios materiales de 20 a 25 °C.*

La incertidumbre en el coeficiente de expansión de los bloques o de las piezas es más difícil de estimar. La mayoría de los bloques patrón de acero menores a 100 mm tienen sus coeficientes de expansión térmica a diferencias menores de cinco décimas de $11{,}5 \times 10^{-6}/°C$, incluso cuando hay variaciones de fabricante a fabricante, y aun de lote a lote del mismo fabricante. Para bloques más largos de 100 mm, la situación es más complicada. Durante el proceso de fabricación las superficies de los bloques se endurecen con el propósito de que el pulido sea el apropiado. Este proceso de endurecimiento sólo afecta de 30 a 60 mm del bloque cercano a la superficie. Para bloques menores a 100 mm esto es el bloque completo y no hay problema. Para bloques más largos, hay una cantidad indeterminada en el centro que está parcialmente

endurecida o sin endurecer. El acero endurecido tiene un coeficiente de expansión térmica más grande que el acero no endurecido, lo que significa que para bloques patrón muy largos, a mayor cantidad de acero no endurecido el coeficiente de expansión térmica del bloque es menor. En la tabla 5.7 podemos observar los coeficientes de expansión térmica de los bloque patrón largos del NIST.

Tabla 5.7 Coeficientes de expansión térmica de los bloques patrón de referencia del NIST (10^{-6}/°C).

Tamaño [in]	Conjunto 1	Conjunto 2
5	11,41	11,27
6	11,33	11,25
7	11,06	11,35
8	11,22	10,92
10	10,84	10,64
12	10,71	10,64
16	10,80	10,58
20	10,64	10,77

En la tabla 5.7 se puede observar que en la medida en que los bloques sean más largos, el coeficiente de expansión térmica resulta sistemáticamente más pequeño. Debido a esas variaciones, es importante utilizar los estándares largos a una temperatura lo más cercana posible a 20 °C para eliminar incertidumbres ocasionadas por la variación del coeficiente de expansión térmica.

Por ejemplo, supongamos que tenemos un bloque patrón de 500 mm, un termómetro con una incertidumbre de 0,1 °C, y el coeficiente de expansión térmica se conoce con una incertidumbre de $\pm\ 0{,}3 \times 10^{-6}/°C$. Cuando las temperaturas de medición son 20 y 25° las incertidumbres son:

$$\delta(\Delta L) = \alpha L L \delta(\Delta T) + \delta(\alpha_L) L \Delta T \qquad (5.3)$$

donde ΔT es la diferencia de temperatura (T-20), y $\delta(\ )$ denota la incertidumbre de la cantidad dentro del paréntesis.

A 25 °C:

$$\delta(\Delta L) = (11{,}5 \times 10^{-6}) \times 500 \times 0{,}1 + 0{,}3 \times 10^{-6} \times 500 \times 5$$
$$= 0{,}58\ \mu m + 0{,}75\ \mu m$$
$$= 1{,}33\ \mu m$$

Propiedades elásticas

Cuando se aplica una fuerza sobre algún material éste sufre una deformación. Para bloques patrón de acero y otros materiales este efecto es pequeño, pero no completamente desprecia-

ble. Hay dos efectos bidimensionales debidos a las propiedades elásticas de los bloques patrón. El primero y de menor importancia es la compresión de los bloques bajo su propio peso. Cuando un bloque se coloca de forma horizontal, la fuerza en cada punto es el propio peso del acero sobre sí, y el acero se comprime ligeramente. Sin embargo, la compresión no está dirigida a la dimensión de medición del bloque y el efecto es despreciable. Si el bloque se coloca de manera vertical la fuerza está dirigida ahora en la dirección de las superficies de medición; y para bloques muy largos, el peso del bloque puede resultar significativo. Resolviendo de forma analítica, encontramos que el cambio en la longitud del bloque es:

$$\Delta L = \frac{\rho g L^2}{2E}$$

Donde:
ΔL = longitud de compresión
ρ = densidad del material
g = aceleración de la gravedad
L = longitud del bloque
E = módulo de Young para el material
Para bloques de acero, la compresión es:
$\Delta L = (7{,}8 \times 10^3\ \text{kg/m}^3 \times 9{,}8\ \text{m/s}^2 \times L^2)/(2 \times 2210 \times 10^9\ \text{N/m}^2) = 0{,}18 \times 10^{-6} L^2$ en metros

Para un bloque de 500 mm la corrección es 45 nm. Las correcciones de esta fórmula son despreciables para bloques menores a 300 mm.

Deformación por contacto en comparaciones mecánicas

Generalmente todas las comparaciones de longitud con bloques patrón o mediciones de longitud se realizan con comparadores de contacto donde una sonda con punta entra en contacto con la superficie aplicando una fuerza. El contacto entre una punta esférica y una superficie plana da como resultado una deformación local de magnitud pequeña pero significativa. Si el bloque o las piezas que se están comparando se hicieron del mismo material, la diferencia de longitud medida entre ellas será correcta, ya que la deformación en cada caso será la misma. Si los materiales son diferentes, entonces la diferencia de longitudes será incorrecta debido a la diferencia en la deformación de ambos materiales. En tales casos, se debe aplicar una corrección por deformación si su magnitud es significativa para la medición.

La deformación total (sonda más objeto) es una función de la geometría y de las propiedades elásticas de las dos superficies en contacto, y de la fuerza de contacto. Hertz desarrolló fórmulas para la deformación total uniaxial basándose en la teoría de la elasticidad y suponiendo que los cuerpos son isotrópicos, que no hay fuerza tangencial en el contacto, y que no se excede el límite elástico en el área de contacto. Varios científicos han verificado la confiabilidad de las fórmulas de Hertz.

Para una sonda con punta esférica y la superficie plana del objeto la deformación uniaxial de la sonda y superficie juntas está dada por:

$$\alpha = \frac{3\pi^{2/3}}{2P^{2/3}\left(V_1 + V_2\right)D_1^{-1/3}}$$

Donde:
$V_1 = (1 - \sigma_1^2)/\pi E_1$
σ_1 = radio de Poisson de la esfera
E_1 = módulo de elasticidad de la esfera
$V_2 = (1 - \sigma_2^2)/\pi E_2$
σ_2 = radio de Poisson del bloque
E_2 = módulo de elasticidad del bloque
P = fuerza
D_1 = diámetro de la esfera

En la tabla 5.8 se observan algunos ejemplos de deformaciones para una sonda de diamante de 6 mm de diámetro, y bloques patrón comunes, a varias presiones.

Tabla 5.8 Deformaciones en la interface en micrómetros (µin en paréntesis).

Material	Fuerza en Newtons		
	0,25	0,50	0,75
Sílice fundida	0,13 (5,2)	0,21 (8,3)	0,28 (11,2)
Acero	0,07 (2,7)	0,11 (4,4)	0,14 (5,7)
Carburo de cromo	0,06 (2,2)	0,12 (3,4)	0,12 (4,6)
Carburo de tungsteno	0,04 (1,6)	0,06 (2,5)	0,08 (3,2)

Las consideraciones que se deben hacer para la selección del radio de la punta de la sonda son las siguientes:

1. Un radio mayor de la sonda corresponde a una menor penetración, entonces la corrección será menor y menos dependiente de la geometría exacta del radio de la punta.
2. Un radio menor de la sonda aumenta su capacidad para remover materiales extraños, como residuos de aceite, vapor de agua, o polvo cuando el bloque se desliza entre las puntas de las sondas.

Aplicaciones de los bloques patrón

Cuando se realizan mediciones de bajo nivel de precisión, rara vez se utilizan bloques patrón en sustitución de las escalas graduadas. En la medida en que los requisitos de precisión se incrementen, es preferible el uso de los bloques patrón a las escalas vernier, aun si las tolerancias especificadas se encuentran dentro del intervalo de discriminación de los instrumentos con escalas vernier. Es preferible utilizar bloques patrón en lugar de calibradores vernier si la medida es mayor a 125 mm (5 in) o medidores de altura vernier si la altura de la pieza es mayor a 250 mm (10 in). También es recomendable usar bloques patrón si las habilidades del metrólogo no están muy desarrolladas todavía.

Es posible hacer las mismas discriminaciones respecto al uso de los micrómetros, aunque su confiabilidad es mayor que la de los instrumentos vernier. Considerando que los micrómetros requieren menos habilidad para obtener resultados comparables, se recomienda su uso cuando los requerimientos de precisión no sean menores a 0,01 mm ni mayores de 150 mm. Para longitudes más grandes es recomendable el uso de bloques patrón, aun cuando los requerimientos de precisión no sean muy exigentes. Una suposición que se hace para estas recomendaciones es que los instrumentos vernier y los micrómetros han sido verificados con bloques patrón.

Para precisiones de hasta 0,002 mm (0,0001 in) no se pueden utilizar instrumentos vernier pero sí micrómetros de 25 mm y 50 mm, sólo hay que asegurarse de que haya un margen de seguridad, el cual puede ser de la dimensión de la tolerancia. No hay muchos problemas a precisiones de ±0,01 mm, pero se debe tener mucho cuidado, ya que incluso un cambio pequeño en la tolerancia podría generar una medición errónea. Si las tolerancias son muy reducidas, es mejor no perder el tiempo y medir con bloques patrón.

Los bloques patrón se utilizan principalmente para medir mediante el método de medición por comparación. Para obtener las mayores ventajas debe considerarse lo siguiente:

1. Contar con los conocimientos necesarios acerca de los cuidados y manipulación de los bloques patrón.
2. Desarrollar la habilidad para calcular los decimales y hacer las combinaciones más adecuadas de bloques patrón.
3. Desarrollar la capacidad de unir los bloques de forma confiable.
4. Comprender el método de medición por comparación.

Reglas para el cuidado de los bloques patrón

Si se siguen ciertas reglas para el uso y cuidado de los bloques patrón, se pueden obtener varias ventajas: se aumenta el tiempo de vida de los bloques, se mantienen sus propiedades metrológicas, conservando así la confiabilidad de las mediciones y, finalmente, se reduce el tiempo cuando se adhieren los bloques al estar estructurando una combinación de ellos.

Regla 1. Nunca intente adherir o utilizar de alguna manera un bloque que haya estado en contacto con astillas, polvo o algún fluido sucio. Cualquier residuo podría impedir una adecuada adherencia y obtener así una medición errónea. Además, durante las maniobras para adherir los bloques las superficies podrían dañarse, lo cual podría incluso inutilizar los bloques.

Regla 2. La evaporación de solventes enfría los bloques patrón de manera severa, provocando su contracción. Cuando se trabaja a precisiones de 0,05 μm o mejores, siempre mantenga limpios los bloques. No los moje en solventes, no los limpie frecuentemente con limpiadores en aerosol ni utilice aire comprimido para remover el solvente excedente.

Para limpiar los bloques de forma apropiada sólo aplique el solvente y séquelos rápido con papel para limpiar lentes. Es importante remover el solvente tan rápido como sea posible con el propósito de minimizar el enfriamiento. Repita estos pasos de limpieza tantas veces como sea necesario hasta que haya removido cualquier residuo de polvo, manchas o aceite.

Regla 3. No permita que los bloques se mantengan adheridos por largos periodos. Sepárelos todos los días.

Regla 4. Cuando no utilice los bloques patrón, manténgalos en un lugar seguro donde no se puedan dañar, de preferencia dentro de su estuche.

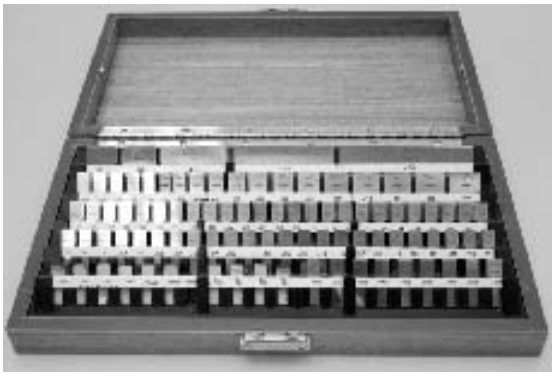


Figura 5.6 *Estuche de madera para los bloques patrón.*

Regla 5. Antes de guardar los bloques, límpielos y cúbralos con aceite o grasa no corrosivos.

Regla 6. Cualquier rebaba puede dañar la superficie, aun aquellas que no se puedan observar a simple vista, deteriorando así las propiedades metrológicas de los bloques. Si alguien ha manipulado inadecuadamente un bloque, o ha ocurrido algún accidente que provoque rebabas en el bloque, antes de utilizarlo use la piedra acondicionadora. Si tiene dificultades para adherir los bloques, podría deberse a las rebabas y debería considerar la calibración de los bloques.

Regla 7. Limpie periódicamente el estuche del conjunto de bloques.

Todos los bloques están sujetos a corrosión; las grasas en las manos de quien manipula los bloques contribuye a ese proceso, por lo que al manipularlos es conveniente utilizar guantes de algodón con dos propósitos: impedir que la grasa humana active el proceso de corrosión y, debido a que el algodón es mal conductor del calor, impedir que los bloques aumenten su temperatura al estar en contacto con la mano del metrólogo, impidiendo con ello su dilatación.

Teoría de la adherencia de bloques patrón

Si dos superficies planas, con buen pulido, se ponen en contacto se adhieren, esta propiedad es muy conveniente para manipular una pila de bloques como si fuera una sola pieza.

Aun cuando dos superficies se pongan en contacto, siempre habrá espacio entre ellas. Las rugosidades siempre existen aunque sean microscópicas, incluso para las superficies mejor acabadas, en la interface se pueden encontrar películas de aceite que llenan el espacio. A pesar de que la superficie se limpie muy cuidadosa y exhaustivamente, puede haber una película de aire muy delgada entre las superficies. Esta separación residual se denomina *intervalo de adherencia*. Si no existiera este intervalo, tendríamos una sola pieza y no dos.

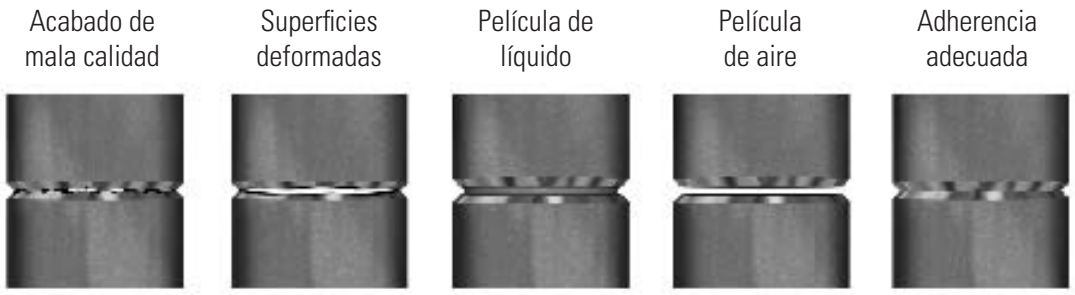


Figura 5.7 *Condiciones de adherencia de dos bloques.*

El intervalo de adherencia se puede reducir a 0,025 μm (~1 μin), aunque en la práctica difícilmente se puede alcanzar este intervalo tan pequeño. En condiciones normales de medición se podrían obtener intervalos de adherencia entre 0,025 μm y 0,050 μm.

El proceso de adherencia no se ha explicado de manera convincente, la teoría más extendida es que su origen está en la atracción molecular. Se supone que algunas moléculas de la superficie están ionizadas, por lo que al entrar en contacto con la otra superficie, esos enlaces rotos tratan de restablecerse, y la atracción coulombiana, que es muy intensa, se encarga de mantener unidos los bloques.

Técnica para adherir bloques patrón

Cuando se adhieren bloques patrón, se está controlando la exactitud de la medición a millonésimas de milímetro; y una vez que se aprende la técnica, adherir bloques de manera adecuada es muy fácil. En la medida en que usted desarrolle la habilidad para adherir bloques patrón, incrementará la confiabilidad de todas las mediciones que haga con bloques patrón.

El proceso para adherir bloques (véase figura 5.8), empieza con su limpieza. Los bloques se deberían limpiar justo antes de iniciar el proceso de adherencia. El tiempo es vital para la adherencia adecuada, si hay un retraso, incluso de un minuto, entre la limpieza y el proceso de adherencia, el polvo se alojará en la superficie de los bloques impidiendo una buena adherencia; es recomendable auxiliarse de una brocha de pelo de camello para remover las partículas de polvo que se depositen en las superficies.

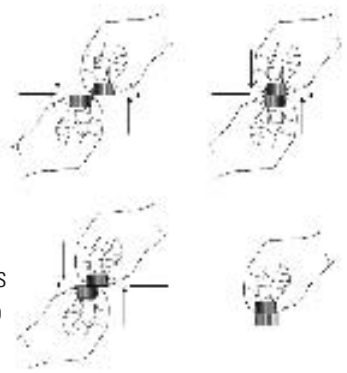
Cuando los bloques se deterioran, resulta muy difícil adherirlos a menos que se utilice una película de aceite. Es aconsejable utilizar una cantidad pequeña de aceite no corrosivo que no contenga partículas microscópicas de polvo que se puedan depositar en las superficies, frecuentemente se aplican con un gotero. El aceite se distribuye sobre la superficie durante el proceso de adherido.

Si se siguen las instrucciones para el proceso de adherencia, se puede minimizar el efecto del polvo: los bloques se deben deslizar uno encima del otro (véase figura 5.8 pasos B y C), el polvo debe removerse durante el proceso y no quedar atrapado entre las superficies de contacto. Mientras más deteriorados se encuentren los bloques, mayor es la presión que debe aplicar para asegurar que los bloques se adhieran.

A. Asegúrese de que los bloques estén limpios

B. Para iniciar, traslape las superficies pulidas aproximadamente 5 mm

C. Mientras presiona ligeramente los bloques, deslícelos uno sobre el otro



D. Los bloques se adhieren

E. Deslice los bloques suavemente hasta que estén unidos

Figura 5.8 *Técnica para adherir bloques rectangulares.*

Cuando empiece a sentir resistencia es porque las piezas han empezado a adherirse. Mientras continúe deslizando los bloques, usted sentirá la adherencia más intensa, debe continuar el deslizamiento hasta que ya no se note un aumento en la resistencia, lo que significa que los bloques ya se han adherido. Durante el proceso de adherido, debe tener mucho cuidado de evitar cualquier movimiento circular, ya que de haber alguna partícula de polvo entre las superficies, éstas podrían resultar dañadas. En cuanto tenga la certeza de que las piezas ya se han adherido, podrá concluir el proceso con ligeros movimientos semicirculares.

Es importante que aprenda a reconocer cuando los bloques se han adherido de manera adecuada; por lo general se puede repetir el intervalo de adherencia con una confianza dentro de los 0,025 μm. Esta medición es lo suficientemente pequeña como para poder despreciar su contribución a la incertidumbre, sin embargo, una mala adherencia podría resultar en errores de 0,250 μm o más. Por lo tanto, en una pila de cinco bloques el error total sería hasta de 1 μm en el intervalo total.

Mientras esté aprendiendo, es recomendable que verifique periódicamente su progreso en un comparador con amplificación entre varias prácticas de adherencia de bloques.

Método para combinar bloques patrón

Los bloques patrón se producen en varias series, y el sistema de Johannson permite un gran número de combinaciones para reproducir longitudes. Sin embargo, es necesario contar con un método para decidir cuáles son los bloques más adecuados para reproducir determinada dimensión. El método debe ahorrar tiempo, reducir la probabilidad de error y utilizar el menor número posible de bloques.

Cuando utilice el método, debe considerar primero los decimales del extremo derecho y continuar eliminando los deci-

Figura 5.9 *Estuche para bloques patrón.*

males de derecha a izquierda. En la figura 5.10 se muestra un ejemplo de la manera en que se eligen los bloques que se han de combinar para reproducir determinada longitud. Típicamente, los bloques se tabulan en magnitud ascendente, así que se debe iniciar con los bloques de la parte inferior, es decir, desde los bloques con incrementos más pequeños.

Para este ejemplo, necesitamos elegir los bloques para reproducir la longitud 25,412 mm, empezando con el 2 y para eliminarlo escogemos el bloque de 2,002 mm. Restamos esta longitud de la longitud total y de esta manera reducimos un decimal; de la dimensión resultante 23,410 mm escogemos el 1 y para eliminarlo utilizamos el bloque 2,41 mm y restamos esta longitud de la resultante, obteniendo una longitud final de 21 mm. Por tanto, si adherimos los tres bloques seleccionados, reproduciremos la longitud deseada de 25,412 mm.

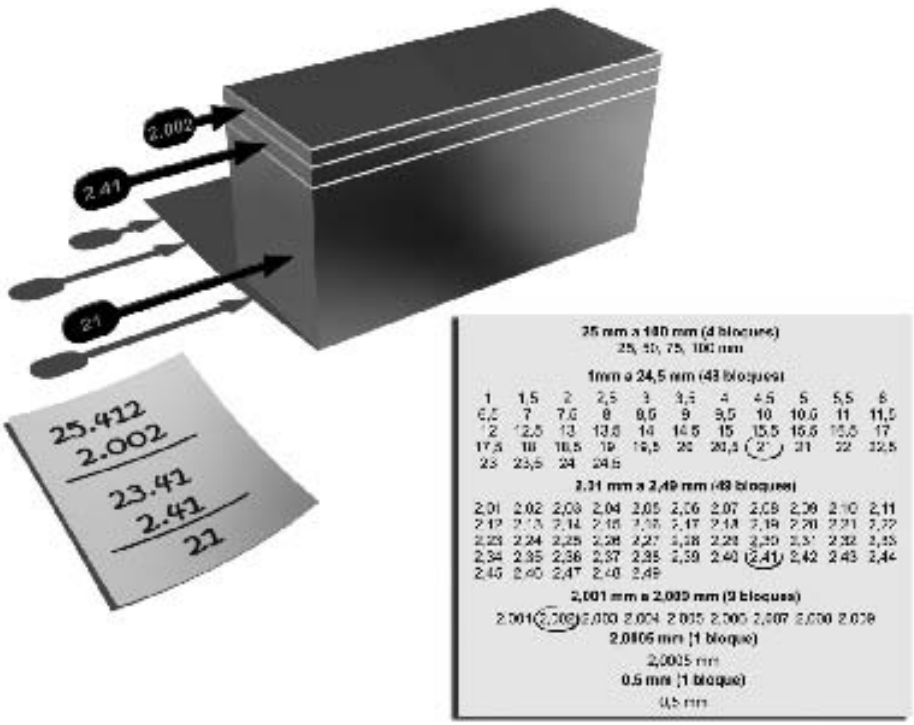


Figura 5.10 *Eliminación de dígitos seleccionados desde la derecha.*

Finalmente, suponga que necesita duplicar la longitud 25,412 mm con otro conjunto de bloques; se procede de la misma manera que en el caso anterior, pero como ya ha utilizado el bloque 2,002 mm, entonces podría reproducirse el 2 con la combinación de 2,003 mm y 2,009 mm, o bien, con los bloques de 2,004 mm y 2,008 mm, procedamos con el primer caso cuya suma es 4,012 mm, que restados a la longitud total nos da una longitud parcial de 21,4 mm. Para eliminar el 4 podemos utilizar el bloque de 2,40 mm, que restados a la longitud residual nos da como resultado 19 mm, y dispone de un bloque con esa medida, entonces si adherimos los bloques de 2,003 mm, 2,009 mm, 2,40 mm y 19 mm obtendremos una pila cuya longitud será de 25,412 mm.

RESUMEN

En este capitulo presentamos una breve reseña del sistema de medición internacional de longitudes y el surgimiento del uso de los bloques patrón como la solución a los requerimientos industriales y comerciales que exigen mantener un adecuado control de calidad.

Se hace una descripción de la teoría y uso de los bloques patrón como son la técnica de adherencia de bloques y el método para combinarlos.

Se mencionó que para simplificar el uso de los bloques patrón se inventó el sistema de tolerancias tanto en el sistema inglés como en el sistema métrico decimal.

También hablamos de las propiedades físicas y térmicas de los bloques patrón. Se hace mención a las recomendaciones que hace la ASME en cuanto a los periodos de recalibración de los bloques para asegurar un sistema de medición confiable en función del modo en que se utilizan.

Se presentan algunas aplicaciones de los bloques patrón y se enumeran las principales reglas para su cuidado.

BIBLIOGRAFÍA

The Gauge Block Handbook. Ted Doiron and John Beers.Dimensional Metrology Group Precision Engineering Division National Institute of Standards and Technology.

Issues and advantages of gauge block calibration by mechanical comparison.
Ruedi Thalmann*, Hugo Baechler Swiss Federal Office of Metrology and Accreditation (METAS), CH-3003 Bern-Wabern.

Some important characteristics of gauge-block artefacts for international comparison. *J. E. Decker.*

Calibration of a gauge block of nominal length 50 mm. This Example is taken from the Supplement 1 of EAL-R2. See EAL-R2-S1 Section S4 for more details. It was generated with GUM Workbench 1.1 (source: S04.SMU).

Quinn, T.J., 1999, "Practical realisation of the definition of the metre (1997)," *Metrologia*, **36**, pp. 211–244.

ISO 3650:1998(E), 1998, 2*nd* Edition 1998-12-15 (International Organization for Standardization (ISO) Central Secretariat, Switzerland, Internet iso@iso.ch).

Decker, J.E., Lapointe, A., Stoup, J., Viliesid Alonso, M., Pekelsky, J.R., 1999, "NORAMET comparison of gauge block measurement by optical interferometry," *Metrologia*, **36**, pp. 421–432.

Baird, K.M., 1957, "Calibration of gauge blocks in Canada," Proceedings of a Symposium on Gage Blocks, NBS August 1955, National Bureau of Standards Circular 581, pp. 21–25.

Decker, J.E., Bustraan, K., de Bonth, S., Pekelsky, J.R., "Improving the quality of your measurement system by bringing it up to date," presented at the 2000 NCSL Workshop and Symposium, Toronto, CANADA, 16–20 July 2000.

Decker, J.E. and Pekelsky, J.R., "Gauge Block Calibration by Optical Interferometry at the National Research Council Canada," presented at the Measurement Science

Conference, Pasadena, CA, Janurary 1997. National Research Council of Canada (NRC), Ottawa, Canada Report No. 40002, 17 pages.

Decker, J.E. and Pekelsky, J.R., 1996, "Uncertainty evaluation for the measurement of short gauge blocks by optical interferometry," National Research Council of Canada (NRC), Ottawa, Canada Report No. 41374, 26 pages.

Decker, J.E. and Pekelsky, J.R., 1997, "Uncertainty evaluation for the measurement of short gauge blocks by optical interferometry," *Metrologia*, **34**, pp. 479–493.

Born, M. and Wolf, E., 1980, *Principles of Optics*, 6th ed. (Pergamon Press, New York), pp. 286–306.

Hariharan P., 1992, *Basics of Interferometry* (Academic Press, Inc., New York), Chapter 8.

Siemsen, K.J., *et al.,* 1996, "A multiple frequency heterodyne technique for the measurement of long gauges," *Metrologia*, **33**, pp. 555–563.

Bowman, W.P. *private communication*.

Birch, K.P. and Downs, M.J., 1994, "Correction to the updated Edl´en equation for the refractive index of air", *Metrologia*, **31**, pp. 315–316.

Bönsch, G. Potulski, E., 1998, "Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edl´en's formulae", *Metrologia*, **35**, pp. 133–139.

Ciddor, P.E. 1996, "The refractive index of air: new equations for the visible and near infrared", *Applied Optics*, **35**(9), pp. 1566–1573.

Giacomo P., 1982, "Equation for the determination of the density of moist air (1981)," *Metrologia*, **18**, pp. 33–40.

Davis R.S., 1992, "Equation for the determination of the density of moist air (1981/1991)," *Metrologia*, **29**, pp. 67–70.

"Guide to the expression of uncertainty in measurement", 1993, 1*st* Edition (International Organization for Standardization, Switzerland), 101 pages.

Glosario

Ajuste (de un instrumento de medición): Operación necesaria para llevar a un instrumento de medición a un estado de funcionamiento conveniente para su uso.

Bloque patrón: Es una longitud estándar que tiene superficies opuestas, planas y paralelas.

Calibración: Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones específicas, la relación entre los valores de las magnitudes indicadas por un instrumento o sistema de medición, o los valores representados por una medida materializada o un material de referencia, y los valores correspondientes de la magnitud realizada por los patrones.

Cantidad: Atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado en forma cuantitativa.

Error: Diferencia entre el valor de la medición y el valor verdadero mesurado.

Error aleatorio: Error que se presenta por variaciones impredecibles, temporales y espaciales que dan origen a las variaciones en observaciones repetidas del mensurando.

Error sistemático: Medida que resultaría de un número infinito de mediciones del mismo mensurado, efectuadas en condiciones de repetibilidad, menos un valor verdadero del mensurando.

Escala (de un instrumento de medición): Conjunto ordenado de marcas con toda numeración asociada, que forma parte de un dispositivo indicador de un instrumento de medición.

Espectrofotometría: Medición de espectros luminosos en la región infrarroja, visible y ultravioleta del espectro electromagnético.

Factor de cobertura: Factor numérico usado como multiplicador de la incertidumbre estándar combinada con el propósito de obtener una incertidumbre expandida.

Fibras ópticas: Elementos por los cuales se puede conducir la luz.

Graduación (de un instrumento de medición): Posicionamiento material de cada marca (eventualmente sólo de ciertas marcas principales) de un instrumento de medición en función del valor correspondientes del mensurando.

Incertidumbre de medición: Parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que se atribuyen al mensurando.

Incertidumbre estándar: Incertidumbre de una medición expresada como una desviación estándar.

Incertidumbre expandida: Cantidad que define un intervalo alrededor de una medición del que se puede esperar que abarque una fracción grande de la distribución de valores que razonablemente pudieran ser atribuidos al mensurando.

Instrumento de medición: Equipo, aparato o máquina que realiza la lectura de una propiedad (o característica) de una variable aleatoria; la procesa, la traduce y la hace entendible al analista encargado de la medición.

Longitud del bloque patrón: Es la distancia perpendicular desde un punto en el bloque en uno de sus extremos a un plano real auxiliar en el otro extremo del bloque.

Medición: Conjunto de operaciones que tienen por objetivo determinar el valor de una magnitud.

Mensurando: Parámetro que se está midiendo.

Metrología: Ciencia de la medición.

Metrología dimensional: Estudia las técnicas de medición que determinan de modo correcto las magnitudes lineales, angulares y acabado superficial.

Optoelectrónica: Rama de la electrónica en la que se introducen elementos ópticos, como fotoceldas, fotodiodos, etcétera.

Patrón: Medida materializada, instrumento de medición, material de referencia o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o varios valores de una magnitud para servir de referencia.

Patrón de referencia: Patrón, en general, de la más alta calidad metrológica disponible en un lugar dado o en una organización determinada, de donde derivan las mediciones que ahí se realizan.

Patrón primario: Patrón que es designado (o ampliamente reconocido), que presenta las más altas cualidades metrológicas y cuyo valor se establece sin referirse a otros patrones de la misma magnitud.

Radiometría: Medición de ondas de radio.

Refractometría: Medición de los índices de refracción de sustancias.

Tolerancia de ubicación: Establece la cantidad permitida en la ubicación especificada de una característica, como tamaño, o las relaciones de los centros del plano y los ejes que puede variar en relación con otras características o dato.

Tolerancia dimensional: Es la anchura del intervalo de medidas permitido para una determinada dimensión.

Tolerancia geométrica: Es la anchura del intervalo de medida permitido para una determinada forma, orientación, perfil, posición o control.

Trazabilidad: Propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón, de modo que ésta pueda ser relacionada con referencias determinadas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones con todas las incertidumbres determinadas.

Índice analítico

A

Ajuste (de un instrumento de medición), 135
Albert Michelson, 112
Asociación Española de Normalización, 15

B

Bloque(s) patrón, 112-117, 135
  aplicaciones, 126-127
  cuidado de los, 127-128
  grados de tolerancia, 117, 118
  método para combinar, 130-131
  nomenclatura y definiciones, 115-117
  propiedades físicas y térmicas, 119-126

C

C. E. Johannson, 113, 114
Calibración, 13, 135
Calibrador(es)
  con vernier, 40-42
  de altura, 65-66
  precauciones al medir con, 43-51
  tipos de, 41-42
Calibres de tolerancia, 66-68
Cantidad, 11, 135
Características geométricas, 79
  símbolos y términos, 79-80
Centro Nacional de Metrología (CENAM), 6
Coeficiente de expansión térmica, 120-124
Coeficientes de sensibilidad, 104
Comisión Electrotécnica Internacional, 15
Comisión Panamericana de Normas Técnicas, 15
Comparador de carátula, 69
Competencia, 13
Componente
  aleatoria, 92
  sistemática, 92
Conversión de unidades, 26-34
Cuantificación de las incertidumbres, 100-102

D

Defectos en las piezas, 76
Deformaciones, 125-126
Desviación estándar experimental, 95
Dimensionamiento geométrico
  principio de máximo material, 78, 79
  símbolos y términos, 79-80
  y tolerancias, 77, 78
Dispersión relativa, 108-109
Distribución
  de probabilidad, 94
  normal, 97, 98, 100
  rectangular, 98, 99, 101
  triangular, 99, 100, 102

E

Error, 90, 135
  aleatorio, 92, 135
  sistemático, 92, 135
Escala (de un instrumento de medición), 41, 42, 52, 135
Escalas, 11
Escuadras, 70
Esferómetro, 63-65
Espectrofotometría, 135
Estándares internacionales, 10, 11, 13, 119
Estimación de la incertidumbre, 92-110
Evaluación de incertidumbre, 93-100
Exactitud, 19
Expansión térmica, 120-124

F

Factor de cobertura, 106, 135
Falsas escuadras, 69
Fibras ópticas, 135
Francis Bacon, 3
Función de densidad de probabilidad, 94

G

Galileo Galilei, 4, 5
Goniómetros, 70
Grados de libertad, 106-110
Graduación (de un instrumento de medición), 42, 52, 61, 135

H

Harold Lyons, 6

I

Incertidumbre
de medición, 90, 91, 135
definiciones, 91-92
estándar, 91, 94-96, 135
estándar combinada, 103-105
estimación de la, 92-110
expandida, 92, 106, 136
identificación de la, 93
Instrumento de medición, 38, 136
clasificación, 39-40
manejo, 40-73
Isocronismo, 5

J

John Harrison, 6

L

Laboratorio Nacional de Metrología de Estados Unidos de América, 113, 114
Ley de propagación de incertidumbres, 104
Ley Federal sobre Metrología y Normalización, 14, 25
Longitud del bloque patrón, 115, 136

M

Medición, 10, 11, 19-20, 38, 136
exactitud de, 19
instrumento de, 38, 136
precisión de, 19
reglas, 38-39
repetibilidad, 20
reproducibilidad, 20
Mensurando, 90, 136
Metro, definición, 7, 112
Metrología, 136
de materiales, 18, 19
definición, 9
dimensional, 17, 18, 38, 136
eléctrica, 16, 17
física, 17
historia de la, 2-9
mecánica, 17, 18
tipos de, 16-19
Micrómetro(s), 51-53
cómo corregir el punto cero en, 58
cómo leer el, 59-63
precauciones al medir con, 55-58
tipos de, 53-55

N

Normalización, 14-16

O

Optoelectrónica, 136
Organización Internacional de Metrología Legal, 15
Organización Internacional de Normalización, 15

P

Patrón
de referencia, 10, 136
definición, 10, 136
primario, 12, 136
Precisión, 19
Presupuesto de incertidumbre, 103
Probabilidad subjetiva, 94

R

Radiometría, 136
Recalibraciones, 13, 118
Refractometría, 136
Regla de senos, 71-73
Reglas para efectuar mediciones, 38-39
Repetibilidad, 20
Reproducibilidad, 20

S

Segundo, definición, 6
Sistema Inglés, 21-23
Sistema Internacional de Unidades (SI), 8, 23-26
Sistemas de unidades, 20-34

T

Teoría de la adherencia de bloques patrón, 128-130
Tiempo Efemeris, 6
Tolerancia, 77, 86-87
características geométricas, 79
de ubicación, 136
dimensional, 76, 77, 136
geométrica, 76, 77, 136
indicaciones de, 81-86
Transportador universal, 71
Trazabilidad, 12, 136
elementos de la , 13

U

Unidades, 11
conversión de, 26-34
del SI, 23-25
del Sistema Inglés, 21-23
que no deben utilizarse, 26
que no pertenecen al SI, 25-26
Unión Internacional de Telecomunicaciones, 15

V

Valor medido, 12